

Луцький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Давиденко Людмила Валеріївна

УДК 621.311:658.26-047.36

Дисертація

**Наукові основи комплексного моніторингу енергоефективності
об'єктів водопровідного господарства**

Спеціальність 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Л.В. Давиденко

Науковий консультант:

Розен Віктор Петрович
доктор технічних наук, професор

Луцьк – 2020

АНОТАЦІЯ

Давиденко Л.В. Наукові основи комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопровідного господарства. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.01 - Енергетичні системи та комплекси (141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка). – Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2020. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної проблеми аналізу тенденцій у енергоспоживанні та чинників, що визначають його ефективність, виявлення прогресу та резервів підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства як підсистеми кінцевого енергоспоживання України шляхом розроблення, розвитку та удосконалення наукових засад, способів і методів моніторингу ефективності енергоспоживання як складової системи енергоменеджменту для удосконалення технологічного процесу водоподачі та процесу електроспоживання, а також оцінки досягнутих результатів.

У роботі набула подальшого розвитку теорія моніторингу енергоефективності як інструменту аналізу ефективності енергоспоживання складних енерготехнологічних систем, реалізація якого дозволила забезпечити в комплексі спостереження, оцінювання, планування та контроль енергоспоживання об'єктів моніторингу з урахуванням технологічних особливостей їх функціонування, а також виявлення шляхів підвищення рівня ефективності енергоспоживання, в тому числі, з урахуванням кращих практик енергоефективності.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні науко-прикладної проблеми виявлення резервів підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства як підсистеми кінцевого енергоспоживання України, яке полягає у розвитку наукових засад комплексного моніторингу енергоефективності складних енерготехнологічних систем шляхом розроблення і удосконалення методів і підходів до оцінювання, планування та контролю ефективності енерго-

споживання і методологічних основ інтегрування їх результатів в систему енергоменеджменту з урахуванням технологічних особливостей функціонування об'єктів водопостачання, що забезпечує виявлення тенденцій у енергоспоживанні, причин, що їх зумовлюють, завдань і шляхів підвищення рівня енергоефективності.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, зазначено зв'язок роботи з науковими програмами та темами, сформульовано мету та наукові завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, визначено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено відомості про апробацію результатів роботи та публікації, зазначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі виконано характеристику водопровідного господарства як складної технологічної системи, що має розгалужену ієрархічну структуру та містить сукупність об'єктів, кожен з яких має свої особливості функціонування та використовує енергетичні (електричну енергію) та природні ресурси (воду) для вироблення продукції (питної води, що подається споживачу), а також аналіз стану ефективності електроспоживання та причин, що зумовлюють високий рівень витрати електроенергії на об'єктах водопровідного господарства.

Виконано аналіз сучасних інструментів забезпечення енергоефективності складних технологічних систем, в тому числі, бенчмаркінгу енергоефективності та моніторингу ефективності енергоспоживання, а також їх призначення та завдань.

Визначено перелік питань, що потребують вирішення для реалізації принципів ефективного управління електроспоживанням об'єктів водопровідного господарства згідно вимог стандартів серії ISO 50000.

Обґрунтовано необхідність розгляду проблеми енергоефективності об'єктів водопровідного господарства як комплексної та ієрархічної проблеми, вирішення якої потребує урахування особливостей та фактичних умов функціонування об'єктів водопостачання, впливу сезонних, кліматичних і соціальних чинників, що зумовлюють зміну цих умов. Обґрунтовано необхідність інтегрування процедур бенчмаркінгу енергоефективності та моніторингу ефективності електроспоживання як взаємопов'язаних складових системи енергетичного менеджменту.

В другому розділі шляхом систематизації методологічних аспектів порівня-

льного аналізу науково обґрунтовано та запропоновано новий підхід до бенчмаркінгу енергоефективності як складової системи енергетичного менеджменту, який спирається на рекомендовану міжнародним та державним стандартами модель методології бенчмаркінгу енергоефективності та передбачає багатофакторний аналіз ефективності енергоспоживання для реалізації етапу аналізу даних моделі.

Розроблено алгоритм реалізації механізму бенчмаркінгу енергоефективності, який містить рекомендації щодо використання методів рейтингування, систематизовані з урахуванням ієрархічного рівня вибраного об'єкту дослідження, завдань та типу бенчмаркінгу, об'єкту наслідування, що забезпечує реалізацію складових етапу аналізу даних моделі бенчмаркінгу та оцінку рівня енергоефективності об'єкте.

Запропоновано комплексну процедуру аналізу енергоефективності водопровідного господарства як складної технологічної системи, яка передбачає кількісну та якісну оцінку рівня енергоефективності її об'єктів з урахуванням їх ієрархічного рівня, типу і мети бенчмаркінгу. Кількісна оцінка для об'єктів нижчих ієрархічних рівнів у випадку внутрішнього бенчмаркінгу базується на методах неграничного аналізу, що забезпечує позиціонування об'єкту серед партнерів бенчмаркінгу та ідентифікацію розриву. Вибір методу передбачає урахування обраного еталону наслідування. Кількісна оцінка для об'єктів верхніх ієрархічних рівнів базується на моделях енергоефективності та кращої енергоефективності методу аналізу середовища функціонування. Їх спільне використання забезпечує ранжування як неенергоефективних, так і енергоефективних об'єктів, визначення лідерів і аутсайдерів, формування бенчмарків енергоефективності для неенергоефективних об'єктів.

Запропоновано спосіб класифікації об'єктів за рівнем енергоефективності, який базується на використанні як розділяючих поверхонь меж енергоефективності (в тому числі, штучних меж, побудованих з урахуванням штучних еталонів, які сформовані на основі кращих значень вхідних/вихідних змінних реальних енергоефективних об'єктів). Такий підхід (на відміну від кластерного та дискримінантного аналізу) забезпечує класифікацію об'єктів за рівнем енергоефективності з урахуванням подібності у структурі вхідних / вихідних змінних. Це дозволяє сформувати досяжні бенчмарки для неенергоефективних об'єктів, а також визначити за-

вдання щодо удосконалення енергоефективних об'єктів. Результати класифікації об'єктів вищого рівня є основою обґрунтованого формування груп партнерів бенчмаркінгу об'єктів нижчого рівня з урахуванням обраного об'єкту наслідування.

Якісна оцінка базується на методі багатокритеріальної порядкової класифікації можливих станів об'єкту за класифікаційними характеристиками енергоефективності, які мають вербальні оцінки та агрегуються в складові критерії вищих рівнів, для яких сформовано градації вербальних оцінок. Це забезпечило оцінювання рівня енергоефективності об'єкту водопровідного господарства шляхом самооцінки без залучення партнерів бенчмаркінгу, визначення шляхів його підвищення.

У третьому розділі розроблено методологію планування електроспоживання об'єктів водопостачання різних ієрархічних рівнів, яка базується на застосуванні структурованої багатофакторної моделі електроспоживання об'єкту, а також результатів формалізованого опису фактичних умов його роботи, що забезпечує визначення відповідно до вимог стандартів серії ISO 50000 базового рівня електропоживання, адаптованого до коливань процесу водоподачі.

Для вирішення завдання моделювання електроспоживання попередньо розглянуто питання формування наборів і бази даних визначальних змінних базового рівня електроспоживання з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту та запропоновано процедуру відбору інформативних змінних. Перший етап процедури передбачає структуризацію вихідного поля атрибутів-характеристик енергоефективності на основі багатокритеріальної послідовної класифікації. Це дозволяє врахувати не лише істотність їх впливу на електроспоживання, а й їх вимірюваність та керованість. Наступний етап передбачає застосування методу експертних оцінок для перевірки узгодженості думок експертів та значущості відмінності вибраних чинників. Завершальним етапом є коригування набору істотних змінних з урахуванням періоду дискретизації для збору даних, результатів статистичного аналізу та логічного аналізу взаємозв'язків.

На основі аналізу методів, які застосовуються для моделювання процесу електроспоживання технологічних систем та їх об'єктів, обґрунтовано доцільність застосування методу групового урахування аргументів для унормування базового рі-

вня електроспоживання до визначальних змінних.

Автоматична структурно-параметрична ідентифікація математичної моделі електроспоживання об'єкту водопостачання із застосуванням нейронних мереж методу групового урахування аргументів базується на груповому урахуванні визначальних змінних та враховує результати формалізованого опису коливань процесу водоподачі, зумовлених впливом сезонних та соціальних чинників. Це забезпечує визначення базового рівня електроспоживання об'єкту водопостачання для типових умов роботи, а також можливість його коригування у випадку їх зміни.

У четвертому розділі розроблено методологію моніторингу коливань процесу водоподачі, зумовлених впливом сезонних, кліматичних та соціальних чинників, що забезпечило виявлення типових умов роботи об'єктів водопостачання, та запропоновано спосіб формалізованого опису умов роботи об'єктів.

Інформаційний простір моніторингу містить характеристику добових графіків витрати води за об'ємами витрати води в різні періоди доби (нічний, основного водоспоживання протягом денних годин, ранішнього та вечірнього водоспоживання); опис нерівномірності добової витрати води та нерівномірності добового графіка витрати води, а також опис його форми.

Для ідентифікації типових умов роботи об'єктів водопостачання розроблено процедуру виділення подібності добових графіків витрати води з мережі водопостачання, яка передбачає послідовне застосування методів кластерного і дискримінантного аналізу та побудову класифікатора добових графіків витрати води, здатного до самоорганізації. Це дозволило не лише виявити закономірності у характері водоподачі та визначити часові діапазони для визначення (спостереження) визначальних змінних і побудови базового рівня електроспоживання, а й дає змогу ідентифікувати належність добових графіків витрати води до одного з типових класів.

Побудова моделі класифікатора добових графіків витрати води базується на виборі кращої індуктивної моделі із застосуванням нейронних мереж методу групового урахування аргументів як алгоритму синтезу моделей та передбачає побудову класифікатора за сезоном та класифікаторів за типом дня для кожного типового сезону. Запропонована процедура ідентифікації належності добового графіка

витрати води до типових кластерів передбачає два етапи: 1) перевірка належності графіка витрати води до відповідного класу за сезоном; 2) якщо добовий графік витрати води не належить до класу нерегулярних днів, то виконується ідентифікація його належності до класу за типом дня. Перевірка умови не належності добового графіка витрати води до класу нерегулярних днів виконується для коректного формування базового рівня електроспоживання та контролю електроспоживання.

Запропоновано спосіб формалізованого опису типових умов роботи об'єктів водопостачання, зумовлених впливом сезонних та соціальних чинників, який передбачає визначення на основі аналізу подібних добових графіків витрати води усереднених характеристик добової витрати води, побудову типового профіля добового графіка витрати води для типових днів відповідних сезонів та визначення його параметрів, що забезпечує можливість планування режиму водоподачі та визначення планових значень технологічних параметрів.

Для урахування аномального впливу кліматичних чинників запропоновано спосіб коригування характеристик добової витрати води з мережі водопостачання шляхом прогнозування добової витрати води та профіля її добового графіка витрати води, процедура якого базується на урахуванні тенденції зміни витрати води та кліматичних чинників і передбачає автоматичну структурно-параметричну ідентифікацію математичної моделі шляхом їх групового урахування на основі застосування нейронних мереж методу групового урахування аргументів. Це забезпечує можливість коригування планових значень добової витрати води, типового профіля добового графіка витрати води та його параметрів з урахуванням впливу аномальних кліматичних та соціальних чинників.

У п'ятому розділі систематизовано та удосконалено процедури механізму контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання, який базується на використанні інструменту статистичного контролю та передбачає контроль електроспоживання, технологічних параметрів та показників енергоефективності, що дає змогу виявити моменти невідповідної зміни рівня ефективності електроспоживання, причини цих змін (що сприяє виявленню факту неефективної організації процесу водоподачі), наявність/відсутність тенденцій до удосконалення

рівня енергоефективності, а також якісно охарактеризувати ефективність режиму електроспоживання на основі інтерпретації контрольних карт Шухарта та застосування побудованих діапазонів енергоефективності, в тому числі, з урахуванням результатів кращих за рівнем енергоефективності об'єктів.

Запропонована процедура також передбачає контроль кліматичних чинників, що дає змогу встановити необхідність коригування планових значень технологічних параметрів водоподачі та базового рівня електроспоживання для отримання адекватних результатів контролю ефективності електроспоживання.

Для повідомлення енергоменеджера про результати контролю запропоновано спосіб налаштування інструментів сигналізації про перевищення встановлених нормативів, який передбачає урахування властивостей контрольованого параметру, характеру його впливу на ефективність електроспоживання, фактичного рівня енергоефективності об'єкту дослідження та завдань щодо його підвищення.

У шостому розділі запропоновано методологічні основи організації комплексного та багаторівневого моніторингу енергоефективності, що передбачають інтеграцію процедур бенчмаркінгу і моніторингу та результатів їх застосування в систему енергетичного менеджменту, побудову інформаційного простору та інформаційного поля, структурування атрибутів-характеристик енергоефективності об'єктів водопостачання з урахуванням пірамідального і стратифікованого підходів, а також наведено практичні результати застосування та інтегрування процедур моніторингу ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання.

Запропоновано об'єктно-орієнтовану формалізацію інформаційної технології комплексного моніторингу енергоефективності, три категорії класів якої містять сукупність класів, об'єднаних відповідно процедурою отримання вихідної інформації про об'єкт дослідження, обчислювальними алгоритмами та моделями, процедурами виконання контролю енергоефективності.

Запропоновано архітектуру інформаційного забезпечення, організації інформаційного простору комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання підприємства та єдиного багаторівневого інформаційного простору моніторингу енергоефективності водопровідного господарства, що передбачає за-

стосування web-орієнтованих технологій збору, опрацювання, інтеграції даних та є основою підвищення оперативності та якості інформаційного забезпечення управлінських рішень.

Ключові слова: енергоефективність, оцінювання рівня енергоефективності, бенчмаркінг енергоефективності, моніторинг енергоефективності, планування електроспоживання, базовий рівень електроспоживання, контроль ефективності електроспоживання, формалізований опис умов роботи об'єкту водопостачання, коливання процесу водоподачі, добовий графік витрати води, метод групового урахування аргументів, контрольні карти.

ABSTRACT

Davydenko L.V. The scientific bases of complex monitoring of the energy efficiency of facilities of water supply enterprise. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.14.01 - Energy systems and complexes (141 Electroenergetics, electrotechnics and electromechanics). – Lutsk National Technical University, Lutsk, 2020. National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to solving the actual problem of energy performance improvement of the facilities of the water supply enterprise through the development of ways and methods for identifying hidden reserves of improving the production system and the process of power consumption, taking into consideration best practices and evaluation of achieved results, as well as to developing and improving of monitoring of power consumption efficiency as a component of the energy management system (EnMS) of enterprise of water supply and sewerage enterprise and industry.

The theory of energy efficiency monitoring was further developed in the thesis as a tool of analysis of energy consumption efficiency of complex energy technology systems, the implementation of which allowed providing simultaneously the evaluation, planning and control of energy consumption efficiency of the facilities of energy technology system, including taking into consideration best energy efficiency practices.

The scientific novelty of the obtained results consists in the theoretical generalization based on the set of performed researches and the solution of the scientific-applied problem of energy efficiency analysis of complex energy technology systems, which consists in development and improvement of methods and approaches of energy efficiency benchmarking, power consumption planning and control of its efficiency, as well as methodological bases of integrating their results into the energy management system to identify and evaluate the progress of energy performance improvement of the system, taking into consideration the operation conditions of its facilities.

In the introduction, the relevance of the topic was substantiated, the relationship of work with scientific programs and topics was indicated, the purpose and scientific tasks, object, subject and methods of research were formulated, the scientific novelty and practical value of the obtained results were determined, the information on the approbation of the results of work and publication was provided, the personal contribution of the applicant was indicated.

In the first section, the water supply system characteristic as a complex energy technology system was performed, which has a branched hierarchical structure and contains a set of facilities, each of which has its own features of functioning and uses energy (electric power) and natural resources (water) to produce product (drinking water supplied to the consumer), an analysis of the state of efficiency of power consumption and the reasons that cause the high level of power consumption at the facilities of the water supply enterprise (WSE) was performed as well.

The analysis of modern tools for ensuring the energy efficiency of complex production systems, including, benchmarking of energy efficiency and monitoring of energy efficiency, as well as their purpose and tasks was carried out.

The list of issues that need to be solved for the realization of the principles of effective management of power consumption of the facilities of the WES according to the requirements of the ISO 50000 standards series were determined.

The necessity of consideration the problem of the energy efficiency of the facilities of the WES as a complex and hierarchical problem, the solution of which needs to take into consideration the peculiarities and actual conditions of functioning of water supply

facilities, as well as the influence of seasonal and social factors that cause the change of these conditions, was substantiated. The necessity of integration of procedures of the energy efficiency benchmarking and monitoring of power consumption efficiency as components of the EnMS was substantiated.

In the second section, through the systematization of the methodological aspects of the comparative analysis, the mechanism of energy efficiency benchmarking as a component of the enterprise EnMS was developed, which is based on the model of the methodology of the energy efficiency benchmarking recommended by international and state standards and contains the substantiation of the features of its components realization for the execution of model steps taking into consideration their purpose in the EnMS.

The algorithm of multifactor comparative analysis of energy efficiency was developed, which contains recommendations on the use of rating methods, systematized taking into consideration the hierarchical level of the selected research object, tasks and type of benchmarking, object of imitation, which provides the realization of the components of the analysis stage of the benchmarking mechanism model and evaluation of energy performance of the production system and its facilities.

The complex procedure of analysis the energy efficiency of WSE as a complex hierarchical production system was proposed, which provides both quantitative and qualitative evaluation of the energy performance of its facilities, taking into consideration their hierarchical level, type and purpose of benchmarking. Quantative evaluation for upper hierarchical level facilities is based on the efficiency and super-efficiency models of the method of the functioning environment analysis. Their joint using provides ranking of both non-energy efficient and energy efficient facilities, identifying leaders and outsiders, forming energy efficiency benchmarks for non-energy efficient facilities. Quantative evaluation for facilities of lower hierarchical levels in case of the internal benchmarking is based on non-boundary analysis methods, which ensures the position of the facility among the benchmarking partners and identification of the gap. The choice of method involves taking into consideration the chosen type of imitation standard. Qualitative evaluation is based on the method of the multicriteria ordinal classification of the possible states of the facility by individual classification characteristics of energy effi-

ciency, which have verbal evaluations and are aggregated into components criteria of higher levels, for which gradations of verbal evaluations were formed. This provides an evaluation of the energy performance of the WES facility through self-evaluation without the involvement of benchmarking partners, and identifies ways of its improvement.

The method of classification of facilities by energy performance was proposed, which is based on the using of efficiency limits as dividing surfaces (including artificial limits that are constructed taking into consideration artificial standards, which are formed based on the really achievable better values of input/output variables). This approach (unlike cluster and discriminant analysis) provides a classification of the facilities by energy performance with taking into consideration similarities in the structure of indicators in the space of input/output variables. This allows forming achievable benchmarks for non-energy efficient facilities, and defining tasks for improving energy efficient facilities. The results of the higher-level facilities classification are the basis for reasonable forming of benchmarking partners group of the lower-level facilities taking into consideration selected imitation facility.

In the third section, the procedure for planning the power consumption of water supply facilities of different hierarchical levels was elaborated, which is based on the construction of a structured multifactor model of power consumption and, according to the requirements of the ISO 50000 standards series, is adapted to the cyclical changes in the conditions of the production process of water supply.

In order to solve the task of power consumption modeling, the issue of formation of sets and a database of relevant variables of the energy baseline (EnB) with taking into consideration the hierarchical level of water supply facilities was previously considered, and the procedure of selection of informative variables was proposed. The first stage of the procedure involves the structuring of the output field of attributes-characteristics of energy efficiency based on the multi-criteria consistent classification. This allows taking into consideration not only the materiality of their influence on power consumption, but also their measurability and controllability. The next stage involves the use of the peer review method to test the consistency of expert opinions and the significance of difference of the selected factors. The final step is to adjust the set of significant variables, tak-

ing into consideration the discretization period for data collection, the results of the statistical analysis and logical analysis of interconnections.

The feasibility of applying the group method of data handling (GMDH) to normalize the EnB to the relevant variables was substantiated based on the analysis of the methods applied to model the process of power consumption of production systems and their facilities.

Automatic structural and parametric identification of the mathematical model of the power consumption process of the water supply facility with the use of GMDH neural networks is based on group handling of relevant variables and takes into consideration the results of the formalized description of cyclical changes of the water supply process that are caused by the influence of seasonal and social factors. This provides the definition of the EnB of the water supply facility for the typical operation conditions, as well as the possibility of adjusting it in case of their change.

In the fourth section, the issues of monitoring cyclical changes in the water supply process caused by seasonal and social factors were considered, and the approach for identifying and formalize description of typical operation conditions of water supply facilities was proposed.

The monitoring information space contains the characteristic of daily charts of water supply (WSCs) by volumes of water supply during different periods of the day (night, main water consumption during day hours, morning and evening water consumption); a description of the irregularity of the daily water supply and the irregularity of the daily WSC, as well as a description of its form.

The procedure of distinguishing similarities of daily WSCs from the water supply network, which involves the consistent application of cluster and discriminant analysis methods and construction of a classifier of WCCs that is capable of self-organization, is the basis of the approach of identifying of typical operation conditions of water supply facilities. This allows identifying not only hidden regularities in the nature of the water supply and defining the time ranges for determining (observing) the relevant variables and constructing the EnB, but also gives the opportunity to determine the belonging of the new WSC to one of the typical classes.

The construction of the model of the classifier of daily WSCs is based on the choice of better inductive model using the GMDH neural networks as an algorithm for model synthesis and provides the construction of the classifier by season and classifiers by day type for each typical season. The procedure of identification the belonging of daily WSC to typical clusters involves two steps: 1) verification of the WSC belonging to the appropriate class by season; 2) if the daily WSC does not belong to the class of irregular days, then the procedure of identification of its belonging to the class by day type is carried out. Verification the condition of non-belonging of the WSC to the class of irregular days is conditioned by the need of the correct formation of EnB and control of power consumption.

The method of formalized description of typical operation conditions of water supply facilities conditioned by the influence of seasonal and social factors was proposed, which provides the determination of the average characteristics of the daily water supply based on the analysis of similar daily WSCs, the construction of a typical profile of the daily WSC for typical days of the appropriate seasons and the determination of its parameters that provides the possibility of planning the water supply regime and determining the planned values of technological parameters.

In order to take into consideration the anomalous influence of climatic factors, the method of adjusting the characteristics of daily water supply from the water supply network by forecasting the daily water supply and profile of its daily WSC was proposed, procedure of which is based on taking into consideration the tendency of change of water supply and climatic factors and provides automatic structural and parametric identification of mathematical model through their group handling based on the application of GMDH neural networks. This provides an opportunity to adjust the planned values of daily water supply, the typical daily WSC profile and its parameters with taking into consideration the influence of anomalous climatic and social factors.

In the fifth section, the procedure of control of power consumption efficiency of water supply facilities was proposed, which is based on the use of the statistical control tool and provides the control of power consumption, technological parameters and energy efficiency indicators, which allows identifying the moments of non-accidental change

in the efficiency level of power consumption, the reasons for these changes (which contributes to detection of the fact of inefficient organization of technological process of water supply), the presence/absence of tendencies to improve the energy performance, as well as qualitatively characterizing efficiency of the power consumption mode based on the interpretation of control charts and application of the constructed ranges of energy efficiency, including with taking into consideration the results of better facilities in terms of energy efficiency.

The proposed procedure also provides the control of climatic factors, which makes it possible to establish the need to adjust the planned values of technological parameters of water supply and EnB to obtain adequate results of control of power consumption efficiency.

In order to inform the energy manager about the results of the control, the method of alarms setup about exceeding the set standards was proposed, which provides taking into consideration the properties of the controlled parameter, the nature of its influence on the power consumption efficiency, the actual energy performance of the research object and the tasks for its improvement.

In the sixth section, the methodological bases for the organization of complex and multi-level monitoring of energy efficiency of WSE was proposed, which include the integration of benchmarking and monitoring procedures, construction of information space and information field, structuring of attributes-characteristics of energy efficiency of water supply facilities with taking into consideration pyramidal and stratified approaches.

The object-oriented formalization of information technology of complex energy efficiency monitoring was proposed, three classes of which contain a set of classes combined according to the procedure of obtaining initial information about the research object, computational algorithms and models, procedures of performing energy efficiency control.

The architecture of information support, organization of information space of complex monitoring of energy efficiency of water supply facilities of the enterprise and the unified multilevel information space of monitoring of energy efficiency of WSE were proposed, which are based on the application of web-oriented technologies of collecting,

processing and integration of data, and are the basis for improving the efficiency and quality of information support of management decisions.

Keywords: energy efficiency, energy performance evaluation, benchmarking of energy efficiency, monitoring of energy efficiency, power consumption planning, energy baseline, cyclic changes in the water supply process, daily chart of water consumption, group method of data handling, control of power consumption efficiency, control charts.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Розен В.П. Моніторинг ефективності енерговикористання в системах комунального водопостачання : монографія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. 148 с.
2. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Формування енергоефективних режимів насосних станцій комунального водопостачання : монографія. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. 104 с.
3. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В., Давиденко В.А. Планування та контроль електроспоживання в системах комунального водопостачання : монографія. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2020. 160с.

Статті в наукових фахових виданнях України:

4. Давиденко Л.В. Задача багатокритерійного керування електроспоживанням систем водопостачання та водовідведення. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2009. *Технічні науки*. Вип. 86. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України. С. 97-99 .
5. Давиденко Л.В. Формалізація задачі багатокритерійного керування електроспоживанням систем водопостачання та водовідведення. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2010. Вип.101 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». С.19-21.
6. Давиденко Л.В. Формування вихідної сукупності показників рівня енергоефективності об'єктів системи теплопостачання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*.

Технічні науки. 2014. Випуск 154 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.5-7.

7. Давиденко Л.В. Використання методології бенчмаркінгу для визначення рівня ефективності енергоспоживання в комунальній теплоенергетиці. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №4. С. 15-20. (РІНЦ)

8. Давиденко Л.В. Принципи побудови інтегрованої системи моніторингу енергоефективності для підприємства водопровідно-каналізаційного господарства. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. № 3 (41). С.107-115. (РІНЦ)

9. Давиденко Л.В. Управлінська функція бенчмаркінгу енергоефективності та його роль в системі енергоменеджменту підприємства. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2015. Випуск 165 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.6-8.

10. Давиденко Л.В. Інтеграція бенчмаркінгу в систему енергоменеджменту підприємства. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2016. Випуск 175 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.23-25.

11. Давиденко Л.В. Бенчмаркінг енергоефективності водопровідних господарств: формування групи партнерів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2018. Випуск 196 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.43-44.

12. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Комплексний підхід до задачі енергозбереження та оцінювання рівня енергоефективності водопостачального підприємства як складної системи. *Відновлювана енергетика*. 2010. №1(20). С. 65-70.

13. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Формування інформаційного поля для оцінювання рівня енергоефективності систем комунального водопостачання. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського*. 2010. Вип. 4/2010 (63), Ч.1. С. 50-53.

14. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Оцінювання рівня енергоефективності об'єктів складних енерготехнологічних систем як задача багатомірного порівняння. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2011. Випуск 116 „Проблеми

енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.76-78.

15. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Використання контрольних карт Шухарта для контролювання ефективності електроспоживання в системах комунального водопостачання. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2012. Вип.1/2012(72), Ч.1. С.31-35. **(Ulrich's periodicals directory)**

16. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Інтерпретація контрольних карт Шухарта для визначення рівня ефективності електроспоживання на об'єктах водопостачання. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2012. Вип.4 (75). С.23-28.

17. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Перевірка можливості використання контрольних карт Шухарта для контролювання рівня ефективності електроспоживання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2012. Випуск 130 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.30-32.

18. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Виявлення прихованих взаємозв'язків у вихідній сукупності показників енергоефективності складних виробничих систем. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2013. Вип. 3(80). С.44-49. **(Ulrich's periodicals directory, Index Copernicus, Inspec)**

19. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Оцінювання рівня енергоефективності складних виробничих систем з позицій багатокритерійної класифікації. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2013. Випуск 142 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.6-8.

20. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Моделювання електроспоживання у складних виробничих системах з урахуванням латентних взаємозв'язків у сукупності показників енергоефективності. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2014. Вип. 2(85). С.40-46. **(Ulrich's periodicals directory, Index Copernicus, Inspec)**

21. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Коменда Н.В., Ярмольська Н.В. Функції енергетичного моніторингу складних виробничих систем та їх завдання для підвищення рівня енергоефективності. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні нау-*

ки. 2014. Випуск 153 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.125-127.

22.Давиденко Л.В. Давиденко В.А., Коменда Н.В. Використання процедур статистичного контролю якості для аналізу ефективності електроспоживання в складних виробничих системах. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2015. Випуск 164 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.104-106.

23.Коменда Т.І., Коменда Н.В., Давиденко Л.В. Округлість, компактність та видовження графіків електричного навантаження. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 2. С. 98-105. **(Index Copernicus)**

24.Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Побудова інформаційного простору моніторингу ефективності енергоспоживання в системах комунального водопостачання. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація/*. 2016. Вип. 29. С. 178-185.

25.Давиденко Л. В., Давиденко В.А., Коменда Н.В. Багатофакторне моделювання електроспоживання в складних виробничих системах з використанням апарату нейронних мереж. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2016. Випуск 175 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.143-145.

26.Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Структура системи комплексного контролю ефективності енергоспоживання об'єктів комунального водопостачання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4 (46). С. 81-88. **(Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PIIIC, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research, Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor)**

27.Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Процедура побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовні-

шніх чинників. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 3 (49). С.31-37. **(Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PIIЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research, Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor)**

28. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Коменда Н.В. Принципи налаштування інструментів сигналізації в системі контролю енергоефективності виробничих об'єктів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2017. Випуск 187 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.18-20.

29. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Процедура планування електроспоживання об'єктів водопостачання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. №6. С.49-54. **(Index Copernicus)**

30. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Урахування циклічних змін процесу водоподачі під час контролю ефективності електроспоживання насосних станцій. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. Вип.2. С. 68-74. **(Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PIIЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor)**

31. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Побудова правил дискримінації добових графіків витрати води з мережі водопостачання з урахуванням сезонних та соціальних чинників. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2018. №3/2018(110). С. 20-25. **(Ulrich's Web Global Serials Directory, eLIBRARY", Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor i Scientific Indexing Services)**

32. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Нейромережеве моделювання електроспоживання в системі комунального водопостачання з урахуванням сезонних змін

водоподачі. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2018. Випуск 195 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.78-79.

33. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Моделювання електроспоживання насосної станції водоподачі. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2019. Випуск 1/2019 (114). С. 20-26. (**Ulrich's Web Global Serials Directory, eLIBRARY", Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor i Scientific Indexing Services**)

34. Розен В.П., Давиденко Л.В., Волинець В.І., Давиденко В.А., Давиденко Н.В. Бенчмаркінг енергоефективності електротехнічних комплексів вугільних шахт. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2019. Випуск 4/2019 (117). С. 134-140. (**Ulrich's Web Global Serials Directory, eLIBRARY", Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor i Scientific Indexing Services**)

35. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Моделювання електроспоживання в системі комунального водопостачання методом групового урахування аргументів *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2019. Випуск 203 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.80-81.

36. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Принципи інформаційного забезпечення комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2019. Випуск 204 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.8-10.

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

37. Davydenko L. Indicators System Creation For The Energy Efficiency Benchmarking Of Municipal Power System Facilities. *Problemele energeticii regionale*. 2015. 1 (27). pp. 58-70. (**Web Of Science**)

38. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V., Davydenko N. Formalization of Energy Efficiency Control Procedures of Public Water-Supply Facilities. *Advances in Intel-*

ligent Systems and Computing. 2017. Vol. 543. pp. 196-202. **(Scopus, Web Of Science)**

39. Korobiichuk I., Davydenko L., Davydenko V., Davydenko N. Information support the operative control procedures of energy efficiency of operation modes of municipal water supply system facilities. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. vol. 920. pp. 571-582. **(Scopus)**

40. Davydenko N., Korobiichuk I., Davydenko L., Nowicki M., Davydenko V. Identification of cyclic changes in the operation mode of the production facility based on the monitoring data. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1044. pp. 189-197. **(Scopus)**

41. Korobiichuk I., Davydenko L., Davydenko N., Davydenko V. Control of the Operation Mode of the Production Facility Based on the Relevant Characteristics of the Technological Process. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 1140. pp 57-66. **(Scopus)**

Статті в інших наукових виданнях:

42. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V., Davydenko N. Control of Operation Modes Efficiency of Complex Technological Facilities Based on the Energy Efficiency Monitoring. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. Proceedings. pp. 531-540. **(Scopus, Web Of Science)**

43. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V. and Davydenko N. Construction of the Energy Baseline of the Pumping Station of Water Supply Taking into Consideration Cyclic Changes in Water Consumption. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*, 2019. Proceedings. IEEE Catalog Number (IEEE Part Number): CFP19U02-USB. pp. 250-262. **(Scopus, Web Of Science)**

44. Davydenko L., Davydenko N. Integration of procedures of benchmarking and energy efficiency control in energy management system of municipal water supply enterprise. *Energetica Moldovei-2016: Aspecte regionale de dezvoltare : Rapoarte*. Chişinău: S. n., 2016. Ed. 3. pp.123-131.

45. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Комплексне оцінювання рів-

ня енергоефективності водогосподарств як складних виробничих систем. *Промислова електроенергетика та електротехніка*. 2010. №.6. С 20-24.

46. Давиденко Л.В. Завдання та основні етапи системи бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів складних виробничих систем. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №10. С. 15-20.

47. Давиденко Л.В. Механізм бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів складних виробничих систем та принципи його реалізації. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №11. С. 11-18.

48. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Призначення процедур комплексного контролю рівня ефективності енергоспоживання об'єктів водопостачання в системі енергоменеджменту водопостачального підприємства. *Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ*. 2016. С. 73-79.

49. Davydenko N., Davydenko V., Davydenko L. Information support for the procedure of power consumption planning in the municipal water supply system. *Modeling, Control and Information Technologies*. 2019. No. 3. pp. 29-32.

50. Давиденко Л.В. Бенчмаркінг енергоефективності об'єктів складних виробничих систем: основні складові та принципи їх реалізації. в кн. : Економічна безпека територіально-виробничих комплексів: енергетика, екологія, інформаційні технології : **монографія** / Коцко Т.А., Чеховська М. М., Лісовські О.Л. [та ін.]; за наук. ред. Лук'яненка С.О., Караєвої Н.В. Київ : «МП Леся», 2015.С. 115- 119).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

51. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Визначення ефективності енерговикористання у виробничих системах за допомогою енергетичного моніторингу. *Підвищення ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції (14-16.06.2012). Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2012. – С. 16-18.

52. Давиденко Л.В., Негодюк Р.В. Рейтингування об'єктів складної виробничої системи як засіб визначення їх рівня енергоефективності. *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Ма-

теріали IV міжнародної науково-технічної конференції (27-29.06.2014). Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2014. С. 79-80.

53. Давиденко Л.В. Принципи побудови інтегрованої системи моніторингу енергоефективності для підприємства водопровідно-каналізаційного господарства. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'15*. Зб. тез доповідей II міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (19-21.05.2015). Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 39-43.

54. Коменда Т.І., Коменда Н.В., Давиденко Л.В. Компактність графіків електричного навантаження. *Оптимальне керування електроустановками. ОКЕУ-2015*. Зб. тез доповідей III міжнародної науково-практичної конференції (14-15.10.2015). Вінниця: ВНТУ, 2015. С. 31.

55. Давиденко Л.В. Призначення та завдання моніторингу ефективності енергоспоживання в складних виробничих системах. *Моніторинг енерго- та ресурсо-використання в складних виробничих системах*. Матеріали доповідей I всеукраїнського наукового семінару (29.04.2015). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 34-37.

56. Давиденко Л.В. Використання методології бенчмаркінгу для оцінювання рівня ефективності енерговикористання. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах*. Матеріали доповідей V Всеукраїнського наукового семінару (15.05.2015). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 56-58.

57. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Завдання та принципи організації комплексного контролю ефективності енерговикористання в системах комунального водопостачання. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*. Збірник наукових праць XVII Міжнародної науково-технічної конференції (17-19.05.2016). Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 1/2016 (4). С. 201-203.

58. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Система комплексного контролю енергоефективності режимів роботи об'єктів комунального водопостачання. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. Збірник наукових праць III Міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції

(30.05-01.06.2016). Київ, НТУУ «КПІ», 2016. С. 94-95.

59. Давиденко Л.В. Інтегрована системи моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання. *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції (26-28.05.2016). Луцьк: РВВЛНТУ, 2016. С. 55-56.

60. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Принципи побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. Збірник наукових праць IV міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (25-27.04.2017). Київ, НТУУ «КПІ», 2017. С. 112-113.

61. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Monitoring and Targeting Systems об'єктів водопостачання: процедура планування ефективного електроспоживання. *Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ'2017*. Тези IV міжнародної науково-технічної конференції (11-13.10.2017). Вінниця: ВНТУ, 2017. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okeu/okeu/schedConf/presentations>

62. Давиденко Л.В. Аспекти комплексного контролю енергоефективності режимів роботи об'єктів комунального водопостачання. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальних господарствах та на промислових підприємствах*. Матеріали доповідей VI всеукраїнського наукового семінару (01.06.2017). Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2017. С.33-36.

63. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Виявлення та урахування циклічних змін водоподачі під час контролю ефективності електроспоживання насосних станцій. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. зб. наук. праць V міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (17-19.04.2018). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. С.101-102.

64. Давиденко Л.В. Принципи застосування концепції бенчмаркінгу для аналізу енергоефективності виробничих об'єктів. *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції (20-23.06.2018). Луцьк : ІВВ Луцького НТУ, 2018. С. 61-64.

65. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Давиденко Н.В. Побудова моделі електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням циклічних змін водоспоживання. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій*. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції (20-21.06.2019). Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2019. С. 7-9.

66. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Призначення бенчмаркінгу в системі контролю енергоефективності виробничих об'єктів. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах*. Матеріали доповідей VII всеукраїнського наукового семінару (21-22.06.2019). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2019. С. 34-37.

Авторські свідоцтва:

67. Свідоцтво про авторське права на технічний твір № 37831. Методика оцінювання рівня ефективності енерговикористання на об'єктах підприємства комунального водопостачання та водовідведення / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Заявка № 37897 від 09.02.2011. Зареєстр. 08.04.2011.

68. Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 83989. Процедура формалізації циклічних змін водоподачі насосних станцій комунального водопостачання / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 85055 від 06.11.2018. Зареєстр. 26.12.2018. Опубл. 25.01.2019. Бюл. № 51. С.851.

69. Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 85617. Процедура побудови базового рівня електроспоживання насосної станції водопостачання / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 85617 від 31.01.2019. Зареєстр. 11.02.2019. Опубл. 26.04.2019. Бюл. № 52. С.644.

70. Свідоцтво про авторське право на науковий твір №88363. Методика контролю ефективності електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 89934 від 16.04.2019. Зареєстр. 08.05.2019. Опубл. 26.07.2019. Бюл. № 53. С.433.

ЗМІСТ

ВСТУП	34
РОЗДІЛ I СТАН ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ВОДО- ПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ШЛЯХИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ	49
1.1 Характеристика ефективності електроспоживання водопровідних го- сподарств та чинників, що його визначають	49
1.1.1 Характеристика об'єкту дослідження як підсистеми кінцевого енергоспоживання України	49
1.1.2 Аналіз ефективності електроспоживання водопровідного госпо- дарства України	52
1.1.3 Аналіз стану енергоефективності насосних станцій та чинників, що визначають ефективність процесу водопостачання	61
1.2 Загальна характеристика проблеми енергетичної ефективності та тен- денцій щодо її забезпечення	62
1.2.1 Аналіз підходів до оцінювання рівня енергоефективності	62
1.2.2 Тенденції та вимоги щодо забезпечення енергоефективності та підвищення її рівня	67
1.3 Огляд сучасних інструментів ефективного управління енергоспожи- ванням та їх призначення для підвищення рівня енергоефективності складних технологічних систем	68
1.3.1 Концепція бенчмаркінгу енергоефективності як інструмент по- шуку кращих практик енергоефективності	68
1.3.2 Роль енергоменеджменту у забезпеченні енергоефективності те- хнологічних систем та їх об'єктів	71
1.3.3 Енергетичне планування та енергетичний аналіз	72
1.3.4 Моніторинг ефективності енергоспоживання та його роль у фор- муванні інформаційної бази для підвищення рівня енергоефек- тивності	73
1.3.5 Контроль ефективності енергоспоживання та його призначення для оперативного управління енергоспоживанням	75
1.4 Завдання щодо забезпечення ефективного управління енергоспожи- ванням та підвищення рівня енергоефективності водопровідного гос- подарства та його об'єктів	76
1.4.1 Аналіз існуючого стану вирішення проблеми	76
1.4.2 Урахування комплексності задачі аналізу та оцінювання рівня енергоефективності водопровідного господарства	79
1.4.3 Урахування ієрархічності проблеми енергоефективності водоп- ровідного господарства	82
1.4.4 Урахування особливостей умов роботи об'єктів водопостачання	

та сучасних принципів підвищення їх рівня енергоефективності	84
1.5 Підхід до вирішення завдань ефективного управління електроспоживанням та підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства	87
1.5.1 Побудова інтегрованої системи комплексного моніторингу енергоефективності	87
1.5.2 Застосування стратифікованого підходу до проблеми енергоефективності та концепції пірамідального підходу	91
1.6 Висновки до розділу та постановка задачі дослідження	94
РОЗДІЛ 2 ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ЙОГО ОБ'ЄКТІВ НА ЗАСАДАХ БЕНЧМАРКІНГУ	97
2.1 Методологічні аспекти бенчмаркінгу енергоефективності складних технологічних систем	97
2.1.1 Завдання та сфери застосування бенчмаркінгу енергоефективності з урахуванням об'єкту наслідування	97
2.1.2 Механізм та управлінська функція бенчмаркінгу енергоефективності	99
2.2 Інструментарій оцінювання рівня енергоефективності з позицій бенчмаркінгу	102
2.2.1 Математична постановка задачі бенчмаркінгу енергоефективності	102
2.2.2 Суть застосування рейтингової оцінки для багатомірного аналізу енергоефективності об'єкту та огляд інструментів рейтингування	104
2.2.3 Порівняльний аналіз методів рейтингової оцінки з урахуванням їх застосовуваності до вирішення завдання бенчмаркінгового дослідження	109
2.3 Оцінювання рівня енергоефективності водопровідних господарств на регіональному рівні із застосуванням непараметричного граничного підходу	112
2.3.1 Обґрунтування вибору методу рейтингового оцінювання	112
2.3.2 Математична постановка задачі та вибір математичної моделі методу аналізу середовища функціонування	114
2.3.3 Рейтингування водопровідних господарств за рівнем енергоефективності на рівні регіонів	118
2.3.4 Класифікація водопровідних господарств регіонів шляхом побудови набору меж енергоефективності	122
2.4 Оцінювання рівня енергоефективності підприємств водопровідно-каналізаційного господарства (зовнішній бенчмаркінг)	127

2.4.1	Формування групи партнерів бенчмаркінгу	127
2.4.2	Рейтингування підприємств із застосуванням моделей енергоефективності методу аналізу середовища функціонування	128
2.4.3	Групкування підприємств за рівнем енергоефективності та формування груп бенчмарків енергоефективності	131
2.4.4	Побудова штучних меж енергоефективності	136
2.5	Оцінювання рівня енергоефективності структурних елементів системи комунального водопостачання (внутрішній бенчмаркінг)	140
2.6	Експрес-оцінка рівня енергоефективності підприємства та його структурних елементів на основі багатокритеріальної класифікації	142
2.6.1	Задача оцінювання енергоефективності як задача багатокритеріальної порядкової класифікації та її математична постановка . . .	142
2.6.2	Оцінювання рівня енергоефективності на основі побудови градацій шкали оцінок правил класифікації	144
2.7	Узагальнений алгоритм оцінювання рівня енергоефективності з урахуванням завдань бенчмаркінгу	149
2.8	Висновки до розділу	151
РОЗДІЛ 3. ПЛАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДРСТВА		154
3.1	Характеристика задачі планування енергоспоживання відповідно до вимог стандартів з енергоменеджменту	154
3.2	Процедура формування базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання водопровідного господарства	155
3.3	Формування наборів і бази даних визначальних змінних базового рівня електроспоживання з урахуванням ієрархічного рівня об'єктів водопостачання	158
3.3.1	Аналіз факторного поля чинників, що мають вплив на електроспоживання об'єктів водопостачання	158
3.3.2	Відбір інформативних визначальних змінних для об'єктів водопровідного господарства різних ієрархічних рівнів	160
3.3.3	Формування бази ретроспективних даних визначальних змінних та електроспоживання	164
3.3.4	Корегування наборів визначальних змінних з урахуванням періоду дискретизації для збору даних та результатів статистичного аналізу	166
3.4	Унормування базового рівня електроспоживання об'єктів водопровідного господарства до визначальних чинників	169
3.4.1	Формальна постановка задачі	169
3.4.2	Вибір методу структурно-параметричної ідентифікації матема-	

тичної моделі електроспоживання	170
3.4.3 Математичне формулювання задачі моделювання електроспоживання об'єктів водопровідного господарства МГУА-подібними нейронними мережами	178
3.4.4 Побудова моделей електроспоживання об'єктів водопровідного господарства з урахуванням періоду дискретизації для збору даних та циклічності процесу водоподачі	182
3.5 Планування електроспоживання об'єктів водопровідного господарства з урахуванням вибраного часового проміжку дії базового рівня електроспоживання	190
3.6 Висновки до розділу	193
РОЗДІЛ 4 МОНІТОРИНГ ЦИКЛІЧНИХ ЗМІН ПРОЦЕСУ ВОДОПОДАЧІ В СИСТЕМІ КОМУНАЛЬНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ	196
4.1 Формування інформаційного простору моніторингу циклічних змін процесу водоподачі	196
4.1.1 Аналіз чинників, що визначають циклічні зміни процесу водоподачі та формування добових графіків витрати води з мережі водопостачання	196
4.1.2 Формалізація вкладу годинних витрат води з мережі водопостачання у конфігурацію добового графіка	198
4.1.3 Формування ознакового простору для опису добового графіка витрати води з мережі водопостачання	201
4.2 Виявлення типових класів подібних графіків фактичної витрати води з мережі водопостачання	205
4.2.1 Формальна постановка задачі класифікації добових графіків витрати води	205
4.2.2 Процедура класифікації добових графіків витрати води та математичний опис її етапів	207
4.2.3 Формування груп подібних графіків витрати води з мережі водопостачання	210
4.3 Прогнозування належності добових графіків витрати води до типових класів на основі класифікатора, здатного до самоорганізації	215
4.3.1 Побудова моделі класифікатора графіків витрати води з мережі водопостачання методом групового урахування аргументів	215
4.3.2 Алгоритм віднесення ГВВ до типових класів	221
4.4 Формалізований опис циклічних змін добової витрати води з мережі водопостачання	222
4.5 Коригування характеристик добової витрати води з мережі водопостачання з урахуванням впливу кліматичних та соціальних чинників	225

4.5.1	Визначення прогнозного значення добової витрати води.	225
4.5.2	Побудова прогнозного профілю добового графіка витрати води .	229
4.6	Висновки до розділу	232
РОЗДІЛ 5 МЕТОДОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА АДАПТАЦІЯ ЙОГО ПРОЦЕДУРИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ БЕНЧМАРКІНГУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА МОНІТОРИНГУ ВОДОПОДАЧІ		235
5.1	Завдання контролю енергоефективності об'єктів водопостачання	235
5.2.	Обґрунтування вибору методу контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопровідного господарства	237
5.2.1	Застосування технології ідентифікації мінливості процесів для вирішення задач контролю та удосконалення ефективності функціонування об'єктів	237
5.2.2	Особливості застосування інструментів контролю ефективності електроспоживання та інструментів статистичного управління процесу	239
5.2.3	Призначення застосування різних інструментів для вирішення завдань контролю енергоефективності	243
5.3	Організація комплексного контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання	245
5.3.1	Встановлення нормативів для контрольованих параметрів	245
5.3.2	Алгоритм комплексного контролю ефективності електроспоживання	248
5.3.3	Коригування процедури контролю з урахуванням впливу кліматичних чинників	250
5.3.4	Коригування процедури контролю з урахуванням результатів бенчмаркінгу	252
5.3.5	Контроль відповідності базового рівня електроспоживання фактичним умовам режиму роботи об'єкту водопостачання	253
5.4	Узагальнена процедура застосування контрольних карт для контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання	256
5.4.1	Дослідження вибірок на відповідність нормальному закону розподілу ймовірностей	256
5.4.2	Визначення меж регулювання контрольних карт	258
5.4.3	Інтерпретація результатів застосування контрольних карт	262
5.5	Організація повідомлень енергоменеджера про відхилення контрольованих параметрів від їх нормативу	266
5.5.1	Призначення інструментів сигналізації в системі контролю енергоефективності об'єктів	266

5.5.2 Принципи налаштування інструментів сигналізації про відхилення від нормативу	267
5.5.3 Урахування результатів бенчмаркінгу під час налаштування інструментів сигналізації в системі контролю ефективності електроспоживання	269
5.6 Висновки до розділу	270
РОЗДІЛ 6 МЕТОДОЛОГІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОРІВНЕВОГО КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ІНТЕГРУВАННЯ ЙОГО ПРОЦЕДУР	273
6.1 Методологічні основи організації комплексного та багаторівневого моніторингу енергоефективності водопровідного господарства	273
6.1.1 Інтеграція процедур бенчмаркінгу та моніторингу енергоефективності	273
6.1.2 Застосування пірамідального та стратифікованого підходів до багаторівневого моніторингу енергоефективності та його інформаційного забезпечення	277
6.2 Концептуальні засади побудови інформаційного простору та інформаційного поля комплексного моніторингу енергоефективності.	281
6.2.1 Трамбування інформаційного простору	281
6.2.2 Складові інформаційного поля моніторингу енергоефективності	282
6.3 Структуризація атрибутів-характеристик енергоефективності об'єктів комплексного моніторингу	284
6.3.1 Формування вихідного поля атрибутів-характеристик енергоефективності стану об'єкту моніторингу	284
6.3.2 Урахування пірамідального та стратифікованого підходів для побудови структурованого інформаційного поля комплексного моніторингу	286
6.3.3 Структуризація атрибутів-характеристик енергоефективності об'єктів комплексного моніторингу на засадах багатокритеріального вибору та експертних оцінок	288
6.4 Об'єктно-орієнтована формалізація інформаційної технології комплексного моніторингу енергоефективності	293
6.5 Побудова архітектури інформаційного забезпечення комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів підприємства водопровідного господарства	299
6.6 Практичні результати застосування та інтегрування процедур моніторингу ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання	304
6.6.1 Результати контролю ефективності електроспоживання в системі	

комунального водопостачання (рівень підприємства)	305
6.6.1.1 Контроль дотримання БРЕ та виявлення причин неефективного електроспоживання	305
6.6.1.2 Виявлення тенденції зміни енергоефективності на основі контролю питомого електроспоживання	308
6.6.2 Результати контролю ефективності електроспоживання водозабору	310
6.6.2.1 Контроль дотримання БРЕ та виявлення причин неефективного електроспоживання	310
6.6.2.2 Виявлення тенденції зміни енергоефективності на основі контролю питомого електроспоживання	311
6.6.2.3 Контроль питомого електроспоживання з урахуванням результатів бенчмаркінгу енергоефективності водозаборів	313
6.6.3 Результати контролю ефективності електроспоживання насосної станції II-го підйому	318
6.6.3.1 Контроль дотримання БРЕ та виявлення причин неефективного електроспоживання	318
6.6.3.2 Урахування результатів контролю кліматичних чинників	321
6.7 Аспекти побудови багаторівневого інформаційного простору комплексного моніторингу енергоефективності водопровідного господарства	322
6.8 Перспективи застосування єдиного інформаційного простору моніторингу для підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства	325
6.9 Висновки до розділу	327
ВИСНОВКИ	330
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	335
ДОДАТОК А Документи про впровадження результатів роботи	372
ДОДАТОК Б Інформаційне поле атрибутів-характеристик енергоефективності технологічного процесу водопостачання та вихідного стану об'єктів водопровідного господарства	383
ДОДАТОК В Результати внутрішнього бенчмаркінгу об'єктів водопостачання КП «Луцькводоканал»	390
ДОДАТОК Г Форма анкети для структуризації атрибутів-характеристик енергоефективності експертами та приклад її заповнення і первинної обробки	391
ДОДАТОК Д Приклад типових профілів добових ГВВ та їх опису	392
ДОДАТОК Е Опис властивостей та методів класів комплексного моніторингу об'єктів водопостачання підприємства ВГ	394
ДОДАТОК Ж Список опублікованих праць за темою дисертації	398

ВСТУП

Актуальність теми. Енергоефективність та енергозбереження є одними із пріоритетів соціально-економічного розвитку в глобальному, національному та регіональному вимірах. Як зазначає Міжнародне енергетичне агентство (МЕА), в сучасних енергетичних стратегіях держав (як споживачів енергетичних ресурсів), проблемі енергоефективності відводиться пріоритетна роль [1]. Енергетична ефективність – це ключовий пріоритет європейської стратегії «Європа 2020», спрямованої на створення умов для стійкого зростання і розвитку [2]. Законодавство та енергетичні стратегії країн Європейського Союзу (ЄС) орієнтовано на стимулювання інвестицій в енергоефективні технології та побудову систем енергетичного планування для підвищення рівня енергоефективності [2]. Серед стратегічних пріоритетів з досліджень та інновацій згідно [3] є розвиток і посилення енергоефективних систем, що включає продовження дослідження за напрямом зменшення енергоємності промисловості ЄС [4].

Україна є однією з енергоємних країн в Європі [2]. Зниження енергоємності економіки згідно [5] є одним із способів оптимізації енергетичного балансу та створення підґрунтя для сталого енергетичного майбутнього країни. Тому, забезпечення енергоефективності як способу зменшення попиту на енергію є одним з напрямків в комплексі заходів щодо стимулювання економічного зростання та зміцнення міжнародних позицій національної промисловості. Підвищення енергоефективності технологій, усунення непродуктивних втрат енергоносіїв, зменшення енергоємності продукції і послуг визначені стратегічним напрямком енергетичної політики України. Відповідно до [6] перехід до ефективного споживання енергоресурсів із впровадженням інноваційних технологій є одним із пріоритетів реалізації Стратегії сталого розвитку "Україна - 2020".

У світлі ситуації стосовно енергозабезпечення України вирішення проблеми енергозбереження та енергоефективності має відбуватись з огляду на спрямованість країни в бік євроінтеграції [7], що передбачає виконання вимог Директив ЄС щодо ефективності кінцевого використання енергії та енергетичних послуг [8, 9],

впровадження та дотримання міжнародних стандартів, в тому числі, з енергетичного менеджменту (ЕМ) та бенчмаркінгу енергоефективності. В [9] наголошено на необхідності регулярної оцінки прогресу у досягненні встановлених на 2030 рік цілей щодо енергоефективності, а вжиті державами-членами заходи, які забезпечують вимірювання або оцінювання підвищення рівня енергоефективності, можуть вважатися способом виконання зобов'язань з енергозбереження. Україна долучилася до Договору про Енергетичне Співтовариство та інших європейських ініціатив, де скорочення споживання енергоресурсів в усіх сферах національної економіки, є одним із напрямів енергетичної політики. Ставши членом Енергетичного Співтовариства, Україна взяла на себе зобов'язання щодо імплементації основних актів енергетичного законодавства ЄС. Проте, не зважаючи на значну кількість нормативно-правових актів різного рівня [10-13], які регламентують діяльність у сфері енергетичної ефективності в Україні, результати діяльності у цьому напрямі є далекі до досконалості і проблема підвищення рівня енергоефективності в усіх сферах національної економіки стає все більш актуальною.

Серед рекомендацій МЕА у сфері енергоефективності, сформованими для України, є [1]: забезпечення збору та використання даних про кінцеве споживання; створення системи показників та механізмів контролю прогресу в сфері енергоефективності та економії енергії; управління в сфері енергоефективності; порівняння досягнутих результатів з поставленими завданнями та кращими практиками ефективного енергоспоживання. При цьому, важливо забезпечити в комплексі планування, дотримання, контроль та оцінку результатів впровадження заходів з підвищення енергоефективності [14]. Це потребує розвитку системи управління енергоефективністю на державному та регіональному рівні, на рівні підприємств, організацій, окремих технологічних процесів чи енергоємних установок. Основою такого підходу має бути впровадження ЕМ на всіх рівнях, підґрунтям якого є розуміння рівня досягнутої/досяжної енергоефективності та аналіз енергетичних показників та іншої енергетичної інформації, на основі якого приймаються рішення про заходи, спрямовані на постійне підвищення рівня енергоефективності. Це вимагає організації моніторингу ефективності не лише енергоспоживання, а й тех-

нологічних процесів об'єкту дослідження, причому не просто як системи збору даних, а як складової інформаційного забезпечення зазначених рішень. В цьому випадку реалізація моніторингу вимагає розробки методологічних основ вирішення низки задач, зокрема, оцінювання рівня енергоефективності, формування завдань щодо його підвищення, планування енергоспоживання та встановлення його базового рівня, адаптованого до умов роботи об'єкту, контролю ефективності енергоспоживання та виявлення прогресу у досягненні поставлених завдань тощо.

Дослідження питань підвищення ефективності енергоспоживання, енергетичної ефективності технологічних процесів та технологій, розробки теоретичних та методологічних основ впровадження систем енергетичного менеджменту (СЕМ), кількісної оцінки рівня енергоефективності, моніторингу та контролю ефективності енергоспоживання знайшли відображення в роботах багатьох вчених, зокрема, О.В. Кириленка, Г.Г. Півняка, А.В. Праховника, Б.С. Стогнія, А.К. Шидловського, Б.І. Баска, О.В. Новосельцева, В.В. Грабка, С.П. Денисюка, В.І. Дешка, С.В. Дубовського, В.А. Жовтянського, М.М. Кулика, Є.Є Нікітіна, В.Ф. Находова, І.І. Пухового, В.П. Розена, О.В. Садового, О.М. Сінчука, О.П. Чорного тощо. За результатами досліджень вчених і фахівців різних галузей пропонується багато технічних рішень, законодавчих ініціатив, методологічних і методичних розробок щодо підвищення рівня ефективності енергоспоживання складних енерготехнологічних систем та їх об'єктів як складових кінцевого енергоспоживання України.

Разом з тим, хоча й питання ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) давно знаходяться в полі зору науковців та його вирішенню присвячено багато праць вітчизняних і зарубіжних дослідників, проблема підвищення рівня ефективності енергоспоживання в різних секторах народного господарства України не втрачає своєї актуальності, а її вирішення вимагає розробок і рекомендацій, які б забезпечили виявлення причин нераціональних витрат енергоресурсів і резервів переходу до ефективного енергоспоживання. Згідно [9], впроваджуючи Директиву 2012/27/ЄС [8] з урахуванням змін, внесених Директивою ЄС 2018/2002 [9], та вживаючи заходи щодо енергоефективності, необхідно приділяти «особливу увагу синергії між заходами з енергоефективності та ефективному

використанню природних ресурсів відповідно до принципів кругова економіка».

Особливо актуальною дана проблема є для водопровідного господарства (ВГ), що є підсистемою кінцевого енергоспоживання. Частка електроспоживання в ВГ складає близько 4% від загального електроспоживання в Україні (у 2018 році у системах водопостачання спожито 2377,9 млн. кВт·год електроенергії). Крім того, ВГ є споживачем життєво важливого природного ресурсу – води, запаси якої необхідної якості є обмеженими, в той же час, технологічні витрати та втрати води в мережах водопостачання складають 754,61 млн. м³ або 35 % від обсягу піднятої води. Дослідження енергоефективності об'єктів ВГ та виявлення шляхів зниження об'ємів енергоспоживання у поєднанні із забезпеченням ефективного режиму водоподачі відповідно до потреби споживачів у питній воді сприяє не лише зниженню попиту на енергію, а й досягненню інших цілей сталого розвитку.

Останніми роками багато уваги приділяється вирішенню питання підвищення рівня енергоефективності об'єктів водопостачання шляхом модернізації їх обладнання та удосконалення режимів роботи, а одним з критеріїв розглядається зменшення витрати електроенергії [15, 16]. При цьому слід враховувати, що система комунального водопостачання (СКВ) є складною технологічною системою (СТС), яка містить велику кількість взаємопов'язаних процесом водопостачання структурних елементів, що споживають енергетичні (електроенергію) та природні (воду) ресурси, кожен з яких має свої особливості функціонування. Енергоефективність СКВ визначається енергоефективністю її структурних елементів. Разом з тим, поведінка всієї системи як наслідок взаємодії складових частин може бути субоптимальною, навіть якщо всі підсистеми мають оптимальні характеристики, що матиме безпосередній вплив на її енергоефективність. Крім того, особливості процесу водопостачання, зокрема, використання води як продукції та як природного ресурсу, обумовлюють ефективність використання електроенергії як в окремих структурних елементах, так і в системі водопостачання в цілому. Слід зазначити, що досягнення реального покращення енергетичної ефективності ВГ та його об'єктів має ґрунтуватися не тільки на технічних рішеннях, але й на досконалому управлінні енергоспоживанням [17]. Ефективне управління енергоефективністю

будь-якого підприємства вимагає впровадження комплексної системи моніторингу показників, що відображають співвідношення витрат енергетичних ресурсів до корисного ефекту від їх використання стосовно окремих установок, технологічного процесу та підприємства в цілому, а також пошуку кращих практик ефективного енергоспоживання та їх адаптації до власних умов. Отже, розробка дієвих способів і методів виявлення прогресу та резервів підвищення рівня енергоефективності ВГ України та його об'єктів з урахуванням оцінки досягнутих результатів та кращих практик ефективного енергоспоживання, розвиток і удосконалення моніторингу енергоефективності як складової СЕМ, спрямованої на постійне удосконалення технологічної системи, є актуальною проблемою. При цьому необхідним є урахування особливостей функціонування об'єктів водопостачання різних ієрархічних рівнів та їх фактичних умов роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконані в дисертаційній роботі дослідження відповідають пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки «Енергетика та енергоефективність» (згідно Закону України від 12.10.2010 р № 2519 - 17 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»), пріоритетному тематичному напрямку «Способи застосування сучасного енергоменеджменту. Технології забезпечення енергобезпеки» (згідно постанови Кабінету Міністрів України від 07.09.2011 р. № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року» із змінами, внесеними згідно постанови Кабінету Міністрів України від 23.08.2016 № 556). Дисертація виконана згідно плану наукових досліджень, що проводяться кафедрою електропостачання Луцького національного технічного університету, в тому числі, за держбюджетною темою «Комплексна програма енергозбереження Волинської області на 1998-2010 роки» ДР № 0199U001046), в якій автор брала участь як виконавець, та темою науково-дослідної роботи «Удосконалення та розробка методів аналізу та підвищення ефективності енерговикористання в складних виробничих системах» ДР №0116U001933, в якій автор брала участь як відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є виявлення резервів підвищення

рівня енергоефективності водопровідного господарства як підсистеми кінцевого енергоспоживання України на основі розвитку науково-методологічних основ комплексного моніторингу енергоефективності складних енерготехнологічних систем шляхом розробки, удосконалення та інтегрування методів та механізмів бенчмаркінгу енергоефективності, планування і контролю електроспоживання з урахуванням особливостей функціонування об'єктів водопостачання.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені такі задачі:

1. Виконати аналіз стану енергоефективності водопровідного господарства, сучасних тенденцій та інструментів управління ефективністю електроспоживання та підвищення рівня енергоефективності, стану вирішення завдань щодо їх реалізації з урахуванням особливостей функціонування об'єктів водопостачання та завдань що потребують вирішення.

2. Запропонувати методологію комплексного моніторингу ефективності електроспоживання як складової енергетичного менеджменту, яка б забезпечувала виявлення тенденцій у електроспоживанні, причин, що їх зумовили, а також шляхів підвищення рівня енергоефективності об'єктів водопровідного господарства.

3. Розробити механізм бенчмаркінгу енергоефективності, який би забезпечував оцінку рівня енергоефективності об'єктів водопровідного господарства, визначення завдань для його підвищення та шляхів їх реалізації.

4. Розробити методологію планування електроспоживання об'єктів водопостачання, яка б дозволяла врахувати їх ієрархічний рівень, циклічні зміни процесу водоподачі та забезпечувала визначення базового рівня електроспоживання адаптованого до умов роботи об'єкту.

5. Запропонувати механізм моніторингу коливань процесу водоподачі об'єктів водопостачання, зумовлених впливом сезонних, кліматичних і соціальних чинників.

6. Запропонувати спосіб формалізованого опису типових умов роботи об'єктів водопостачання та ідентифікації їх зміни, а також корегування результатів опису з урахуванням впливу аномальних кліматичних чинників.

7. Розробити механізм контролю ефективності електроспоживання об'єктів

водопостачання, який би дозволяв врахувати зміну фактичних умов їх роботи, зумовлену впливом сезонних, кліматичних і соціальних чинників, забезпечував можливість виявлення тенденцій до підвищення (погіршення) рівня енергоефективності, а також урахування кращих практик ефективного електроспоживання.

8. Запропонувати концепцію інтегрування результатів процедур комплексного моніторингу енергоефективності в інформаційну систему енергоменеджменту підприємства та побудови інформаційного простору комплексного моніторингу енергоефективності водопровідного господарства.

Об'єкт дослідження: ефективність енергоспоживання об'єктів водопровідного господарства.

Предмет дослідження: методи і способи аналізу, планування, оцінювання та контролю ефективності енергоспоживання об'єктів ВГ, виявлення тенденцій у енергоспоживанні, завдань і резервів підвищення рівня ефективності енергоспоживання.

Методи дослідження. Методичною основою дисертаційного дослідження є комплекс загальнонаукових та спеціальних методів, зокрема: аналіз і узагальнення відомих наукових результатів за темою дисертації, методи експертного опитування, рейтинговий аналіз, статистичний аналіз, морфометричний аналіз фігур різної форми, методи теорії класифікації і розпізнавання образів, багатокритеріальної порядкової класифікації, математичного моделювання, прогнозування, статистичного контролю процесу.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна одержаних результатів полягає у вирішенні науко-прикладної проблеми виявлення резервів підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства як підсистеми кінцевого енергоспоживання України, яке полягає у розвитку наукових засад комплексного моніторингу енергоефективності складних енерготехнологічних систем шляхом розроблення та удосконалення методів і підходів до оцінювання, планування та контролю ефективності енергоспоживання та методологічних основ інтегрування їх результатів в інформаційну систему енергетичного менеджменту з урахуванням технологічних особливостей функціонування об'єктів водопостачан-

ня, що забезпечує виявлення тенденцій у енергоспоживанні та причин, що їх зумовили, завдань і шляхів підвищення рівня енергоефективності. Зокрема:

- запропоновано та обґрунтовано новий науково-методологічний підхід до багаторівневого комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопровідного господарства, який на відміну від існуючих передбачає інтегрування механізмів і методів бенчмаркінгу енергоефективності та моніторингу ефективності електроспоживання, в тому числі, планування та контролю з урахуванням технологічних та режимних особливостей об'єктів водопостачання, що в комплексі дає змогу оцінити рівень енергоефективності об'єкту, виявити тенденції у електроспоживанні, причини, що їх зумовили, та шляхи підвищення рівня енергоефективності, в тому числі, з урахуванням кращих практик ефективного енергоспоживання;

- науково обґрунтовано і запропоновано новий підхід до бенчмаркінгу енергоефективності, який на відміну від існуючих передбачає сукупне застосування методів кількісного і якісного оцінювання, а також класифікацію об'єктів з урахуванням подібності в структурі вхідних/вихідних змінних, що дозволяє не лише оцінити рівень енергоефективності об'єкту дослідження, а й дає змогу врахувати умови його функціонування, забезпечує визначення досяжних бенчмарків, формування завдань та виявлення можливих шляхів підвищення рівня енергоефективності;

- вперше розроблено науково-методологічні основи планування електроспоживання об'єктів водопровідного господарства, що на відміну від існуючих підходів базуються на застосуванні набору багатофакторних моделей електроспоживання, побудованих для типових умов роботи об'єкту моніторингу шляхом групового урахування визначальних змінних базового рівня електроспоживання, сукупність яких сформовано з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту, істотності впливу змінних на ефективність електроспоживання, їх вимірюваності та можливості контролю, а також на врахуванні результатів формалізованого опису водоподачі, що забезпечує визначення базового рівня електроспоживання адаптованого до фактичних умов роботи об'єкту;

- вперше запропоновано спосіб моніторингу коливань процесу водоподачі, зумовлених впливом сезонних, кліматичних і соціальних чинників, який базується

на ідентифікації за допомогою побудованих класифікаторів належності добових графіків витрати води з мережі водопостачання до одного з класів та застосуванні процедури прогнозування добової витрати води та профіля її добового графіка, що дозволяє виконати формалізований опис водоподачі та забезпечує врахування фактичних умов роботи об'єкту водопостачання;

- удосконалено механізм контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопровідного господарства, в якому контроль електроспоживання доповнено контролем технологічних параметрів процесу водоподачі, показників енергоефективності та кліматичних чинників, а також процедурою виявлення моментів зміни умов роботи об'єкту, що дає змогу виявити не лише факт зміни ефективності електроспоживання, а й причини, що її зумовили, наявність (відсутність) тенденцій до підвищення рівня енергоефективності, в тому числі, у порівнянні з кращими об'єктами, встановити момент та необхідність корегування планових значень технологічних параметрів процесу водоподачі та базового рівня електроспоживання, що дозволяє врахувати фактичні умови роботи об'єкту.

- набули подальшого розвитку науково-методологічні аспекти організації інформаційного забезпечення енергоменеджменту, яка передбачає інтегрування результатів процедур бенчмаркінгу енергоефективності, планування електроспоживання і контролю його ефективності та формування єдиного інформаційного простору комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопровідного господарства, що забезпечує формування інформаційної бази знань для прийняття управлінських рішень щодо підвищення рівня енергоефективності об'єктів з урахуванням їх ієрархічного рівня та фактичних умов роботи.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що виконані дослідження сприяють адаптації вимог стандартів серії ISO 50000 до умов роботи об'єктів водопостачання та спрямовані на виявлення тенденцій до підвищення/зниження рівня енергоефективності об'єктів ВГ, пошук шляхів його підвищення та забезпечення постійного удосконалення технологічного процесу водоподачі та ефективності електроспоживання, зокрема:

- процедура бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів ВГ, яка передбачає ви-

бір методу оцінювання рівня енергоефективності з урахуванням типу бенчмаркінгу, фактичного рівня енергоефективності об'єкту дослідження, вибраного об'єкту наслідування дозволяє сформулювати досяжні бенчмарки енергоефективності та визначити завдання щодо удосконалення об'єкту як на регіональному рівні, так і на рівні підприємства та його структурних елементів;

- процедура експрес оцінки енергоефективності об'єктів водопостачання забезпечує оцінювання рівня енергоефективності шляхом самооцінки без залучення партнерів бенчмаркінгу та виявлення причин низького (недостатньо високого) рівня енергоефективності, шляхів його підвищення та прийняття рішень щодо першочерговості заходів;

- запропонований підхід до ідентифікації впливу на витрату воду з мережі водопостачання сезонних, кліматичних та соціальних чинників, а також спосіб формалізованого опису цих змін, який передбачає побудову типових профілів добових графіків витрати води (ГВВ) для типових умов роботи об'єкту та можливість їх корегування з урахуванням впливу аномальних кліматичних чинників є основою планування ефективного режиму водоподачі та корегування графіків ввімкнення/вимкнення насосних агрегатів насосної станції II підйому, що сприяє узгодженню графіків водоспоживання та водоподачі з урахуванням сезону та типу дня, що забезпечує можливість зниження витрат електроенергії на подачу води в мережу водопостачання за рахунок зменшення перекачування надлишкових об'ємів води.

- запропонована процедура планування електроспоживання з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту водопостачання дозволяє врахувати фактичні умови функціонування об'єкту, зумовлені впливом сезонних та соціальних чинників, забезпечує визначення (відповідно до вимог серії стандартів ISO 50000) базового рівня енергоспоживання (БРЕ) для типових режимів роботи та можливість його корегування з урахуванням впливу кліматичних чинників;

- процедура контролю ефективності електроспоживання, що передбачає контроль відповідності фактичних значень контрольованих параметрів (електроспоживання та технологічних параметрів процесу водоподачі з урахуванням фактичних умов роботи технологічного об'єкту, а також питомого електроспоживання) їх за-

планованим значенням дає змогу виявити не лише моменти невідповідності рівня ефективності електроспоживання, а й причини цих змін, що зумовлені як неефективною організацією технологічного процесу водоподачі, так і впливом кліматичних чинників, а також дозволяє виявити наявність/відсутність тенденцій до підвищення рівня енергоефективності, якісно охарактеризувати ефективність режиму електроспоживання, в тому числі, з урахуванням результатів кращих за рівнем енергоефективності об'єктів;

- запропонований підхід до налаштування інструментів сигналізації про відхилення фактичного електроспоживання від БРЕ та контрольованих технологічних параметрів і показників енергоефективності (ПЕЕ) від їх нормативів передбачає можливість урахування типових режимів роботи об'єкту водопостачання, фактично досягнутого рівня енергоефективності та завдань щодо його підвищення, що забезпечує інформативність повідомлень енергоменеджера про результати контролю та сприяє прийняттю обґрунтованих рішень щодо необхідності корегування режиму водоподачі та підвищення рівня ефективності електроспоживання об'єкту.

Результати досліджень, виконаних в даній дисертаційній роботі можуть бути використані фахівцями з питань забезпечення ефективного енергоспоживання, фахівцями енергоаудиторських компаній, енергоменеджерами та енергетиками комунальних підприємств.

Отримані в дисертаційній роботі результати впроваджено на підприємстві водопровідно-каналізаційного господарства КП «Луцькводоканал» м. Луцьк під час організації систем контролю та планування електроспоживання об'єктів водопостачання як складових СЕМ підприємства, прийнято до впровадження для організації планування режиму роботи насосних станцій другого підйому системи комунального водопостачання КП «Тернопільводоканал» м. Тернопіль та контролю його ефективності. Результати дисертаційної роботи використані в НДІ автоматики та енергетики «Енергія» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під час розроблення систем планування та контролю електроспоживання промислових підприємств, в інституті «Кривбаспроект» під час виконанні робіт по проектуванню та впровадженню ав-

томатизованого робочого місця енергоменеджера гірничо-металургійних підприємств України, а також та в НДГРІ м. Кривий Ріг під час оцінювання рівня енергоефективності об'єктів гірничо-металургійних підприємств. Основні теоретико-методичні та практичні результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі як частина дисципліни «Енергетичний аудит та енергоменеджмент», що викладається в Луцькому НТУ під час підготовки магістрів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Результати дисертаційної роботи використано під час розробки «Методики оцінювання рівня ефективності енерговикористання на об'єктах підприємства комунального водопостачання та водовідведення» (Свідоцтво про авторське право на технічний твір № 37831 від 08.04.2011); «Процедури формалізації циклічних змін водоподачі насосних станцій комунального водопостачання» (Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 83989 від 26.12.2018); «Процедури побудови базового рівня електроспоживання насосної станції водопостачання» (Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 85617 від 11.02.2019); «Методики контролю ефективності електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників» (Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 88363 від 08.05.2019).

Підтвердженням впровадження результатів дисертаційної роботи є наявність відповідних актів, довідок та свідоцтв (додаток А).

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [18] – [87], були отримані у Луцькому національному технічному університеті.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення, теоретичні та практичні результати, які виносяться на захист, отримано автором самостійно під час виконання досліджень у Луцькому національному технічному університеті у період 2006–2020 роки. У роботах написаних та опублікованих в співавторстві, автору належать такі результати: у роботах [18-20] розроблено методологічні засади вирішення завдань комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів комунального водопостачання з урахуванням особливостей та фактичних умов їх функціонування. У роботах [38, 68] – обґрунтовано застосування моніторингу ефективності електро-

споживання в системах комунального водопостачання як складової СЕМ підприємства, принципи та особливості реалізації його функцій для об'єктів водопостачання. У роботах [29, 31, 36, 62, 84] – обґрунтовано необхідність та сформульовано аспекти і методологічні засади комплексного оцінювання рівня енергоефективності системи комунального водопостачання та її структурних елементів, а також запропоновано спосіб такого оцінювання. У роботах [47, 48, 59, 80, 85] - запропоновано підхід до виявлення та формалізації циклічних змін водоподачі, зумовлених впливом сезонних та соціальних чинників, розроблено та удосконалено процедуру їх ідентифікації та спосіб їх урахування під час контролю ефективності електроспоживання. У роботах [35, 37, 42, 49, 50, 52, 82] обґрунтовано необхідність багатфакторного моделювання електроспоживання та доцільність застосування різних інструментів моделювання, виконано побудову моделей електроспоживання об'єктів ВГ різних ієрархічних рівнів з урахуванням сформованого набору відповідних істотних змінних, що мають вплив на ефективність електроспоживання. У роботах [32-34, 39, 58, 60, 87] – обґрунтовано доцільність застосування методу статистичного управління процесом для контролю енергоефективності та запропоновано механізм контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопровідного господарства різних ієрархічних рівнів із застосуванням контрольних карт. У роботах [43, 55, 65, 74, 75] – запропоновано принципи організації та побудови системи контролю енергоефективності, розроблено та удосконалено архітектуру комплексного контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання. У роботі [45] – запропоновано механізм організації інформативних повідомлень енергоменеджера про результати контролю ефективності електроспоживання та описано способи налаштування інструментів сигналізації для контрольованих параметрів з урахуванням їх властивостей та фактично стану об'єкту дослідження з точки зору енергоефективності. У роботах [44, 46, 56, 77, 78, 86] – розроблено методологічні основи планування електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням циклічних змін водоподачі, зумовленого впливом сезонних та соціальних чинників, та процедуру побудови БРЕ, адаптованого до фактичних умов роботи об'єкту. У роботах [30, 41, 53, 57, 66] - запропоновано концептуальні засади інформаційного забезпечення функцій моніторингу (оцінювання рівня

енергоефективності та процедур планування і контролю) енергоефективності об'єктів водопостачання та побудови інформаційного поля атрибутів-характеристик енергоефективності. У роботах [40, 71] – виконано аналіз інформативності результатів застосування морфометричних показників для опису добових графіків різної форми. У роботах [51, 69] – розроблено процедуру визначення рівня енергоефективності та бенчмарків для наслідування на основі рейтингування об'єктів. У роботах [61, 83] – обґрунтовано призначення та запропоновано методологічні аспекти інтеграції бенчмаркінгу енергоефективності в СЕМ підприємства.

Апробація результатів наукових досліджень. Основні наукові положення та результати дисертації доповідались, обговорювались та отримали позитивну оцінку на наукових конференціях, в тому числі 6 закордонних, та наукових семінарах, зокрема: 3RD International conference «Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development» (Chisinau, Republic of Moldova, 2016 p.); International conference «System, Control and information Technology, SCIT-2016» (Warsaw, Poland, 2016 p.); XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna «Automation 2019. Automatyzacja Nowości i Perspektywy» (Warsaw, Poland, 2019 p.); International conference «Mechatronics'2019: Computing in Mechatronics» (Warsaw, Poland, 2019 p.); 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (Kyiv, Ukraine, 2019 p.); 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange - DSMIE-2019 (Lutsk, Ukraine, 2019 p.); XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna «Automation 2020. Automatyzacja Nowości i Perspektywy» (Warsaw, Poland, 2020 p.); 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (Kyiv, Ukraine, 2020 p.); International Conference on Electrical, Electronic and Information Sciences (Vilnius, Lithuania, 2020); Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» (м. Харків, 2009 р., 2010 р., 2011 р., 2012 р., 2013 р., 2014 р., 2015 р., 2016 р., 2017 р., 2018 р., 2019 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика» (м. Кременчук, 2010 р., 2011 р., 2016 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Оптимальне керування електроустановками» (м. Вінниця, 2015 р., 2017 р.); Міжнародна науково-технічна

та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS» (м. Київ, 2015 р., 2016 р., 2017 р., 2018 р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2016 р.); Міжнародна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах» (м. Луцьк, 2012 р., 2014 р., 2016 р., 2018 р.); IV Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій» (м. Тернопіль, 2019); Всеукраїнський науковий семінар «Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах» (м. Луцьк, 2009 р., 2011 р., 2013 р., 2015р., 2017 р., 2019 р.); Всеукраїнський науковий семінар «Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах» (м. Луцьк, 2015 р.); Науково-практичний семінар з міжнародною участю «Економічна безпека держави і науково-технологічні аспекти її забезпечення» (Недінські читання, 2015) (м. Київ, 2015 р.).

Публікації. За результатами досліджень за темою дисертації опубліковано 70 наукових праць, у тому числі: 3 монографії, 38 статей у наукових фахових виданнях (з них 5 статей у періодичних виданнях інших держав, які внесені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, 13 статей у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 9 статей в інших наукових виданнях (у тому числі: 2 статті у виданнях інших держав, з них 1 стаття у виданні, яке внесене до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science; 1 стаття у вітчизняному виданні, яке внесене до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science), 4 свідоцтва про авторське право на науковий твір, 16 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій та семінарів.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Робота містить 301 сторінку основного друкованого тексту, 82 рисунки, 37 таблиць, список використаних джерел із 357 найменувань та 7 додатків. Загальний обсяг роботи – 410 сторінок.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ШЛЯХИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

1.1 Аналіз енергоефективності водопровідного господарства та чинників, що його визначають

1.1.1 Характеристика об'єкту дослідження як підсистеми кінцевого енергоспоживання України

Житлово-комунальне господарство (ЖКГ) є складним комплексом, компоненти якого взаємозв'язані єдиною метою по забезпеченню функціонування житлового фонду країни та надають послуги населенню, підприємствам і організаціям по постачанню води, газу, тепла. ЖКГ є підсистемою кінцевого енергоспоживання України (рис. 1.1), де згідно [89] споживання палива складає близько 30% загального енергоспоживання, або 70 млн т.у.п.; електроенергії – близько 10,0 млрд кВтгод. Згідно рейтингу Ukrainian Energy Index показник енергоефективності промисловості складає 51,1% від рівня ЄС, сільського господарства – 37,1%, сектора послуг – 46,1%, будівництва – 11,3%, ЖКГ та житлового сектора – 61,9%. Головний потенціал щодо підвищення рівня ефективності кінцевого енергоспоживання міститься у сферах промисловості та ЖКГ.

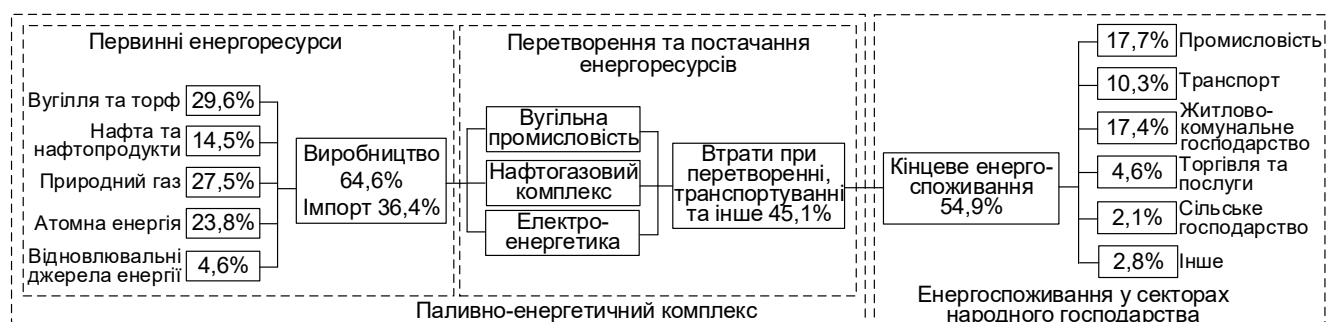


Рисунок 1.1 – Укрупнена структура постачання енергоресурсів та кінцевого енергоспоживання України станом на 2018 рік

В структурі ЖКГ істотне місце відводиться водопровідно-каналізаційному господарству (ВКГ). ВКГ є найбільшим споживачем електроенергії у комунальній сфері. Згідно [89] у ВКГ споживається близько 75% від загальногалузевого елект-

роспоживання (близько 4% від загального електроспоживання в Україні).

Основною функцією ВКГ є надання послуг з водопостачання споживачів та водовідведення. Оптимальне співвідношення споживацького попиту і подачі води, що виключає її дефіцит і забезпечує надійне постачання водою соціальної сфери і промислового виробництва, є головною гарантією життєдіяльності споживачів. Виходячи з цього, ВКГ слід розглядати як складну систему взаємостосунків суб'єктів, зв'язаних технологічними процесами видобування води з природних джерел, очищення, перекачування води і стоків (системи комунального водопостачання та водовідведення - СКВВ) та споживання води (споживачів) [29].

Сучасна СКВВ представляє собою сукупність структурних елементів, які разом утворюють складну ієрархічну систему, що здійснює забір, розподіл та відведення води [18]. Кожен структурний елемент (насосні станції I-го підйому, II-підйому, водопровідна мережа, КНС, очисні споруди) представляє собою підсистеми СКВВ. На кожному ієрархічному рівні мають місце свої особливості технологічного процесу, правила його організації, закони управління режимами роботи. СКВВ є складною структурою, всі підсистеми якої взаємозв'язані і функціонують синхронно. Спільним для всіх рівнів є цільовий продукт – вода, отже, існує єдина задача, яка визначає цілісність системи, – передача цільового продукту з мінімальними затратами. Для СКВВ характерне різноманіття внутрішніх та зовнішніх зв'язків, в першу чергу жорсткого технологічного зв'язку: природне джерело води – система комунального водопостачання (СКВ) – споживач – система водовідведення – природне джерело води (рис. 1.2). Наявність такого зв'язку зумовлює створення нерозривної єдності СКВВ і споживачів.

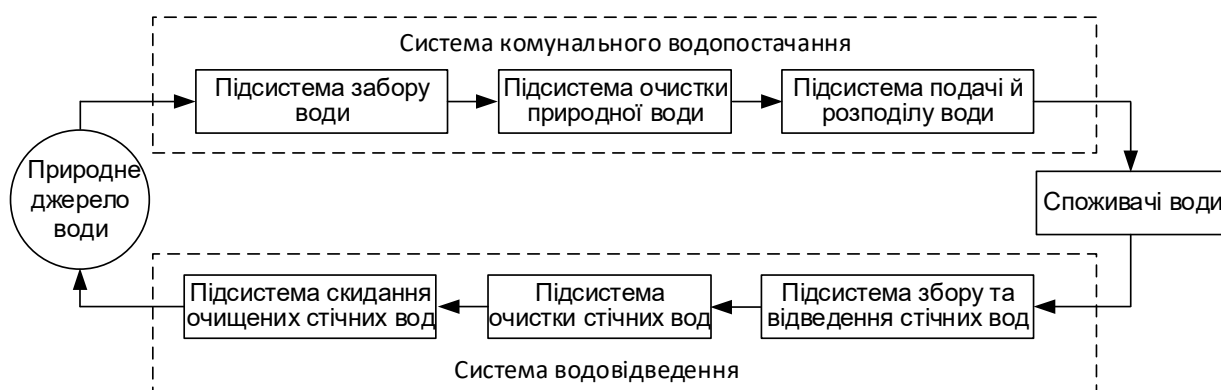


Рисунок 1.2 – Структура взаємозв'язків між підсистемами СКВВ

Підсистеми СКВ мають на меті забезпечення споживачів водою. Режим роботи СКВ населених пунктів формуються під дією багатьох факторів, що залежать від запасів і якості природних вод, умов проживання і роботи людей, технічних параметрів системи тощо. Загальний водорозбір в СКВ формується як корисне водоспоживання та включає технологічні витрати та втрати води. Корисне водоспоживання визначається потребами населення у воді для задоволення господарсько-питних потреб. На нього впливають кліматичні, фізіологічні (кількість води на господарсько-питні та санітарно-гігієнічні потреби) та соціальні чинники (щоденний ритм життя). Через підвищення світового споживання води в умовах її дефіциту та високого рівня забруднення в багатьох державах доступ до водних ресурсів є обмеженим [88]. Існує думка, що через гостру нестачу запасів питної води, цей вид природного ресурсу може стати «наступним вуглицем» [88]. У той же час втрати води у мережах водопостачання є значними (до прикладу, в ЄС становлять 24% від загальної кількості споживаної води [9]).

СКВ містить низку підсистем, технологічні об'єкти яких споживають електроенергію для перекачування води та подачі її в мережу, а також воду, яка є не лише продукцією, що продається споживачам, а й ресурсом, необхідним для реалізації процесу водопостачання (рис. 1.3).

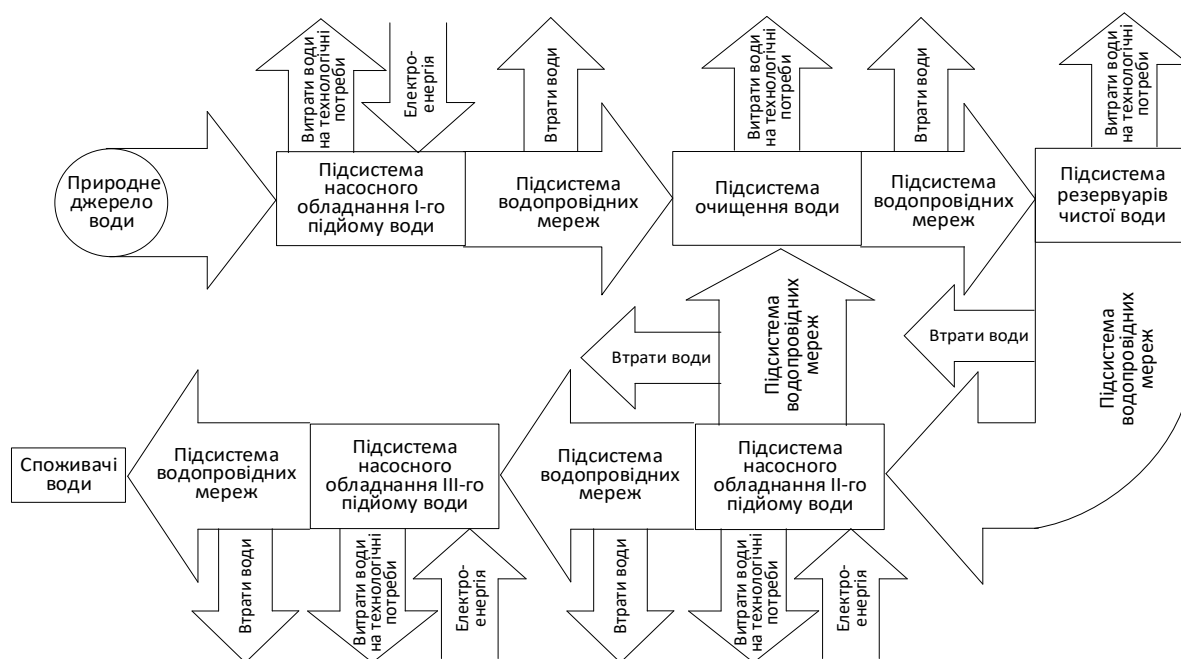


Рисунок 1.3 – Характеристика підсистем СКВ як споживачів енергетичних ресурсів

Як споживач електроенергії СКВ характеризується складним зв'язком між внутрішніми підсистемами. Кожен об'єкт СКВ є складним електротехнічним комплексом, ефективність функціонування якого впливає на ефективність використання енергоресурсів всієї СКВ. Найбільші витрати електроенергії пов'язані з перекачуванням води і залежать від об'єму води, що перекачується і напору (тиску), що створюється при її перекачуванні. У свою чергу, витрати води, що перекачується залежать від об'ємів водоспоживання, а необхідний напір - від втрат напору в системі подачі і розподілу води і необхідного вільного напору в місцях водорозбору. Очевидно, що перекачування невиправданих об'ємів води зумовлює нераціональні витрати електричної енергії. В директиві ЄС [9] зазначено, що ефективне управління витратою води є одним із чинників енергозбереження.

Таким чином, можна стверджувати, що СКВ - це складна динамічна система із впорядкованою ієрархічною структурою, яка є єдністю технічного комплексу водопостачання, енергетичних та природних ресурсів та активності споживачів, що має багатопараметричні взаємозв'язки між параметрами технологічного процесу та споживанням електроенергії, поведінка якої внаслідок взаємодії складових частин може бути субоптимальною, навіть якщо всі підсистеми мають оптимальні характеристики [18, 29].

1.1.2 Аналіз ефективності електроспоживання водопровідного господарства України

Витрати енергоресурсів на одиницю виготовленої продукції та наданих комунальних послуг у $1,5 \div 2$ рази перевищують зарубіжні показники [89]. Високий рівень електроспоживання підприємств ВКГ обумовлений неефективним використанням електроенергії у технологічних процесах внаслідок значного зношення труб та діючого обладнання, високого рівня втрат води в мережах та надмірного її використання, а також початково високою енергоємністю продукції, що визначено історичними умовами розвитку систем комунального водопостачання (СКВ), який відбувався в умовах планової економіки при низьких цінах на енергоресурси, що наклало свій відбиток на проектні здатності систем [90]: СКВ будувались

за типовими проектами із запасом по характеристиках обладнання в розрахунку на укрупнення міст в майбутньому; більшість водоканалів були побудовані (або реконструйовані) приблизно в один період, що визначило використання типового обладнання, матеріалів, технологій, типових проектів без урахування індивідуальних особливостей міст; запас по характеристиках встановленого обладнання, що не відповідає реальним потребам водопостачання, зумовило формування високого рівня енергоємності продукції.

Згідно [89] станом на 2010 рік близько 35% водопровідних мереж перебувають в аварійному стані і потребують заміни; втрати води у зовнішніх мережах та необліковані витрати в житловому фонді перевищують 30%, в окремих випадках сягають 60% від поданої в систему водопостачання води; четверта частина водопровідних очисних споруд і мереж фактично відпрацювала термін амортизації; знос основних фондів складає понад 60%; потребує заміни 70% насосних станцій (НС) та 98% насосних агрегатів (НА). Як свідчить аналіз даних за період 2010-2017 рік, наведених в щорічній Національній доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні [91-97], з роками ситуація істотно не поліпшилась (рис.1.4-1.6).

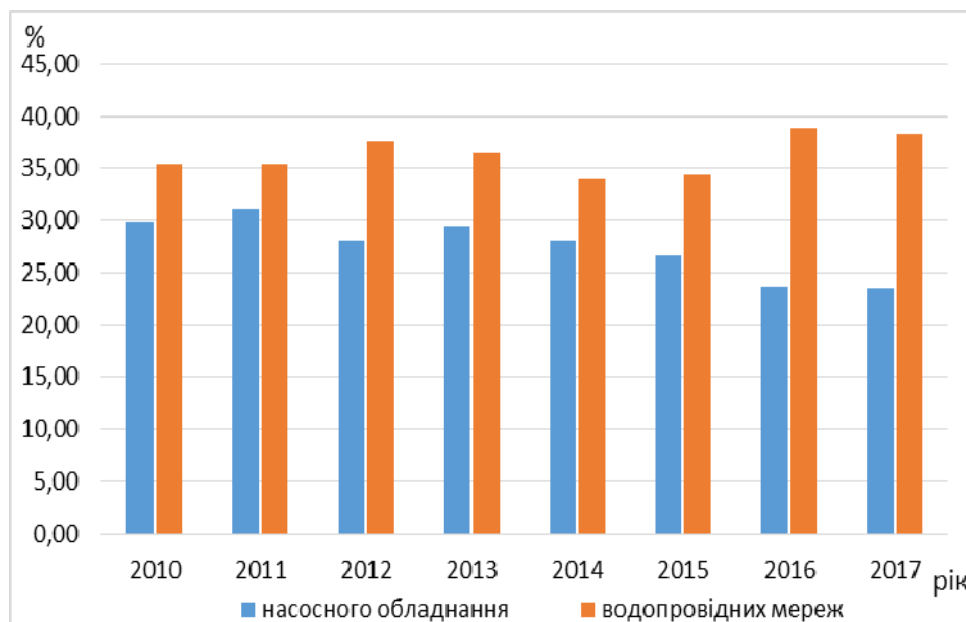


Рисунок 1.4 - Динаміка частки насосного обладнання та водопровідних мереж ВГ України, що потребують заміни

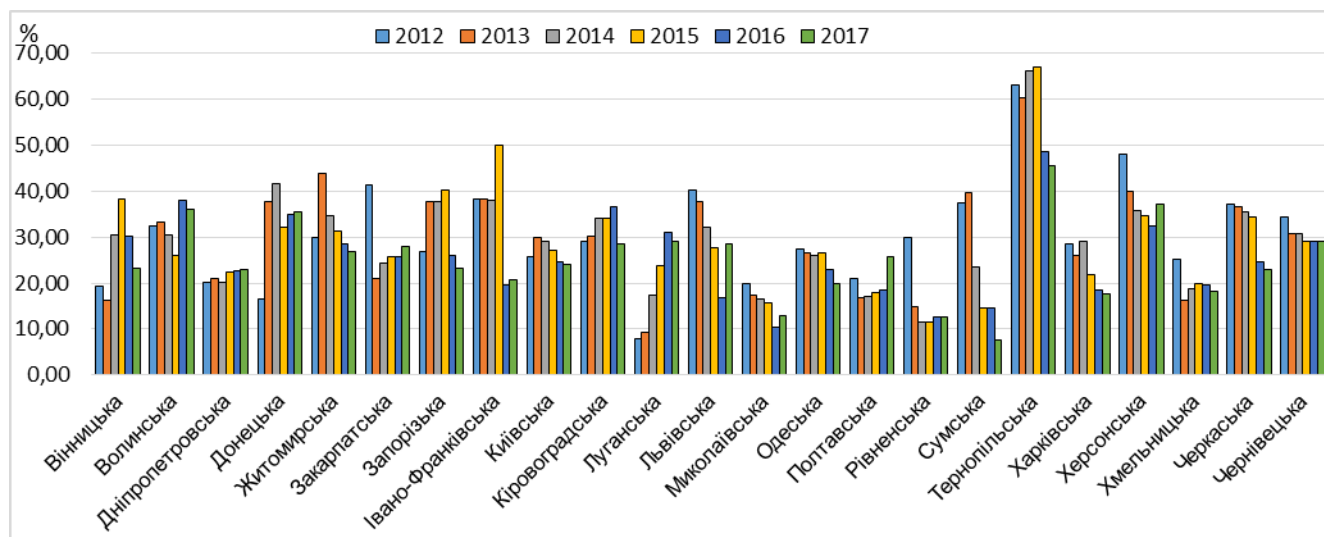


Рисунок 1.5 - Динаміка частки насосного обладнання ВГ областей України, що потребують заміни

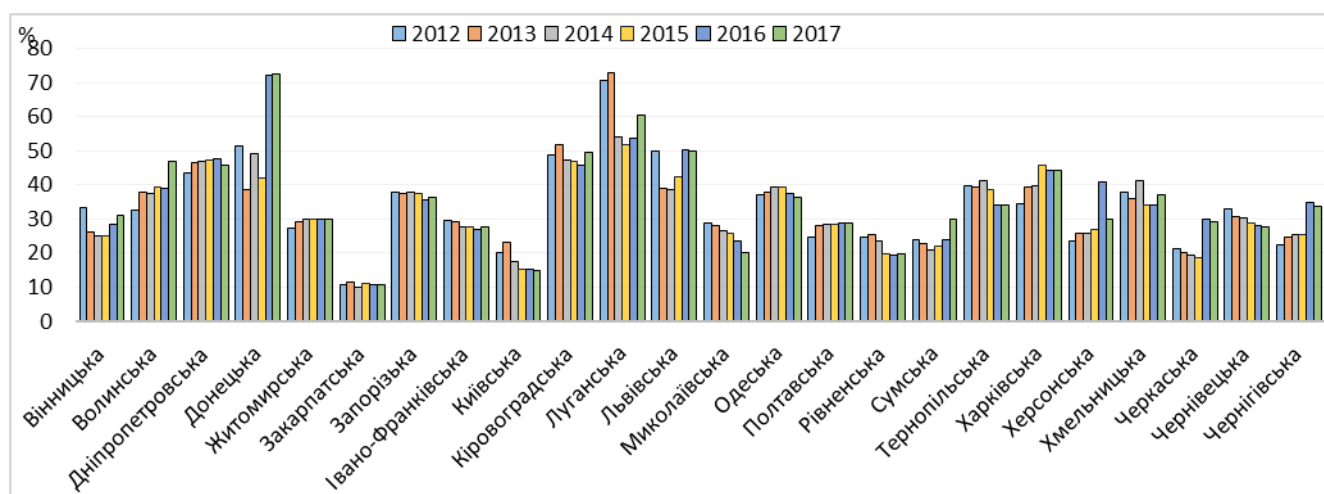


Рисунок 1.6 - Динаміка частки водопровідних мереж ВГ областей України, що потребують заміни

Незадовільний технічний стан мереж і насосного обладнання спричиняє до 40% втрат електроенергії. Середні питомі витрати електроенергії на подачу води складають близько 1,0 кВтгод/м³ [89]. Вагому частку в структуру витрат на електроенергію вносять перевитрати цільового продукту, які виникають як в результаті нераціональних витрат води на власні потреби СКВ для організації технологічного процесу водопостачання, так і через витоки внаслідок аварій та невчасного обслуговування обладнання структурних елементів. Нераціональне використання

води зумовлює додаткові витрати електроенергії до 1,1 млрд кВт*год в рік [89]. В [9] зазначено, що ефективне управління витратами води може зробити значний внесок у економію енергії.

Як завдання щодо підвищення рівня енергоефективності в [89] визначено забезпечення економії електроенергії по ділянках СКВ, зокрема, на водозаборах та НС - I підйому - до 20%; на НС - II, III підйому - до 40%; на НС підкачування - до 25%. Серед основних заходів на період до 2014 року у ВГ в [89] відзначено заходи, спрямовані на модернізацію обладнання (заміна на НС електрообладнання, насосів, двигунів на менш енергоємні з більш високим коефіцієнтом корисної дії (ККД); регулювання частоти обертів робочого колеса насоса; встановлення регуляторів тиску на водопровідних мережах; встановлення будинкових приладів обліку холодної води; впровадження автоматизованих систем управління НС; встановлення частотних перетворювачів для регулювання потужності і обертів електродвигунів тощо). Від реконструкції НС передбачалось зниження споживання електроенергії на 20-30% [89]. Як свідчить аналіз даних [91-97], впровадження рекомендованих заходів та виконання зазначених в [89] завдань забезпечили зменшення обсягів електроспоживання та питомого електроспоживання у ВГ України загалом (рис. 1.7), у ВГ областей України (рис. 1.8) та по окремих підприємствах ВКГ (рис.1.8), причому, як по підприємству в цілому (рис.1.9), так і по окремих технологічних процесах водопостачання (рис. 1.10).

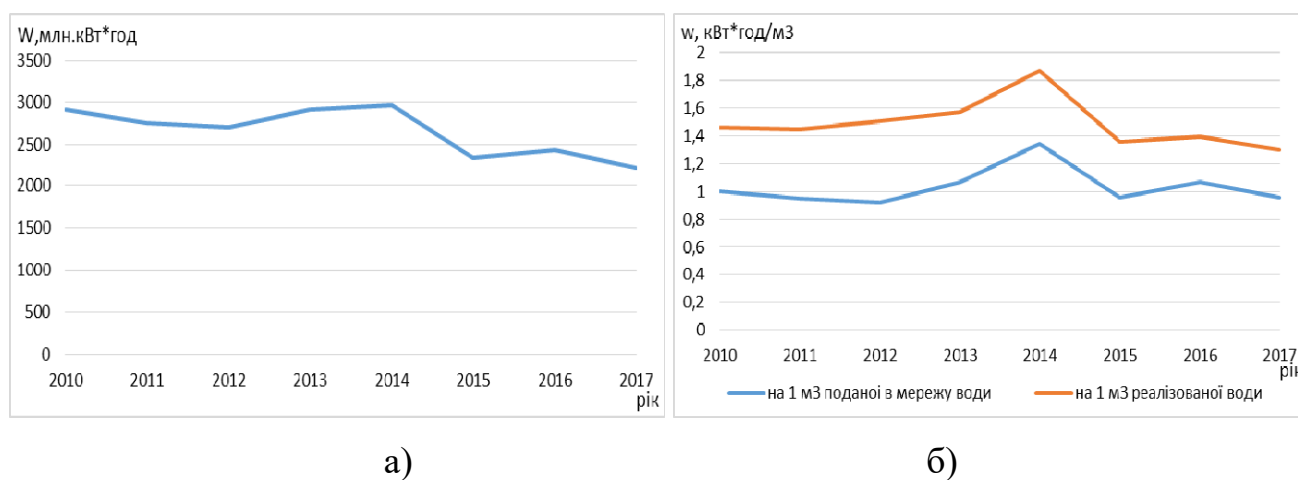
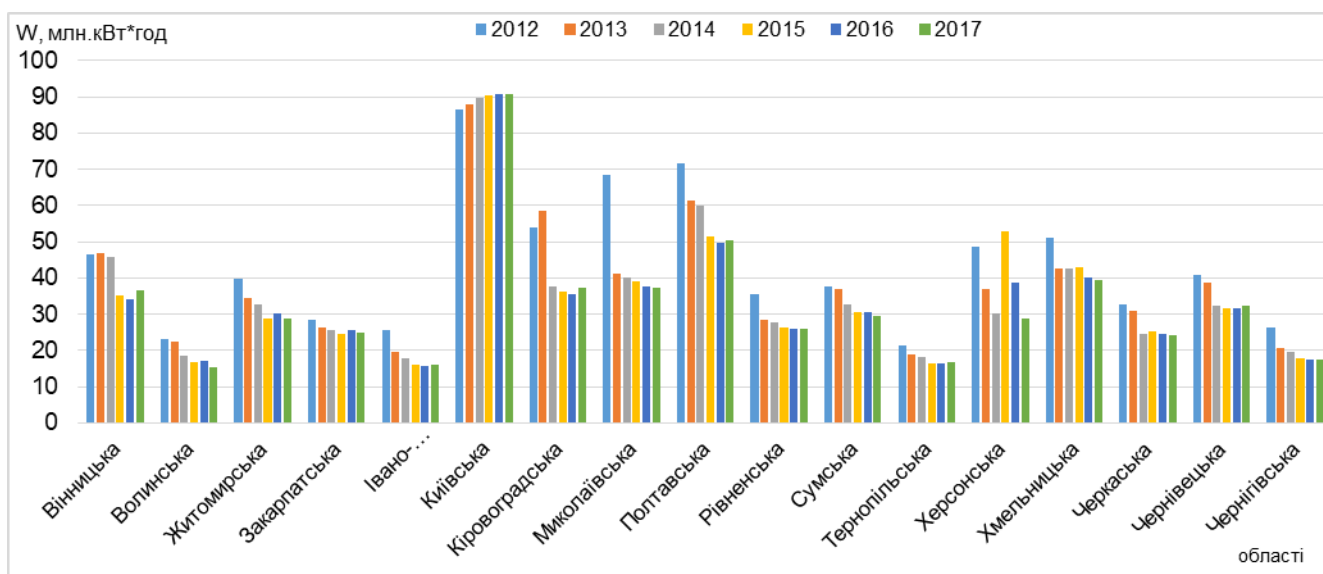
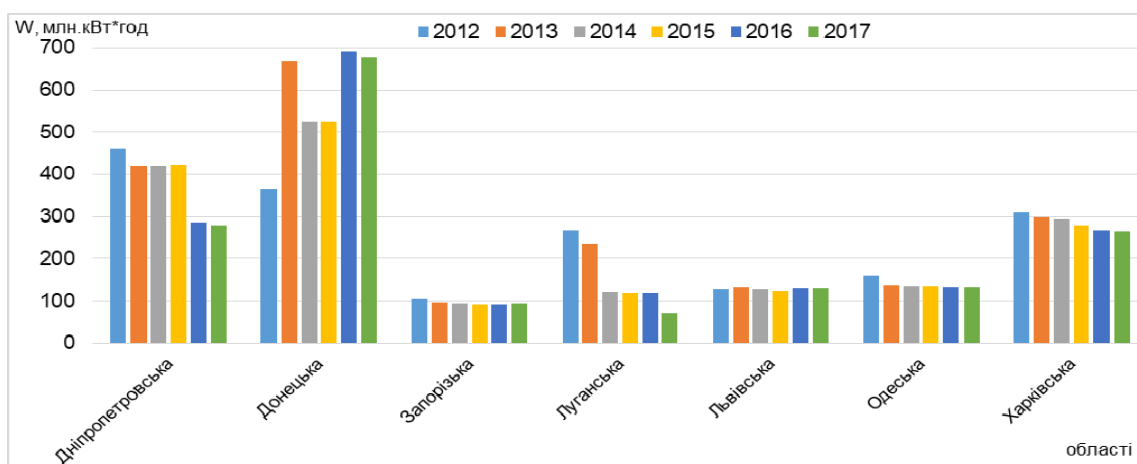
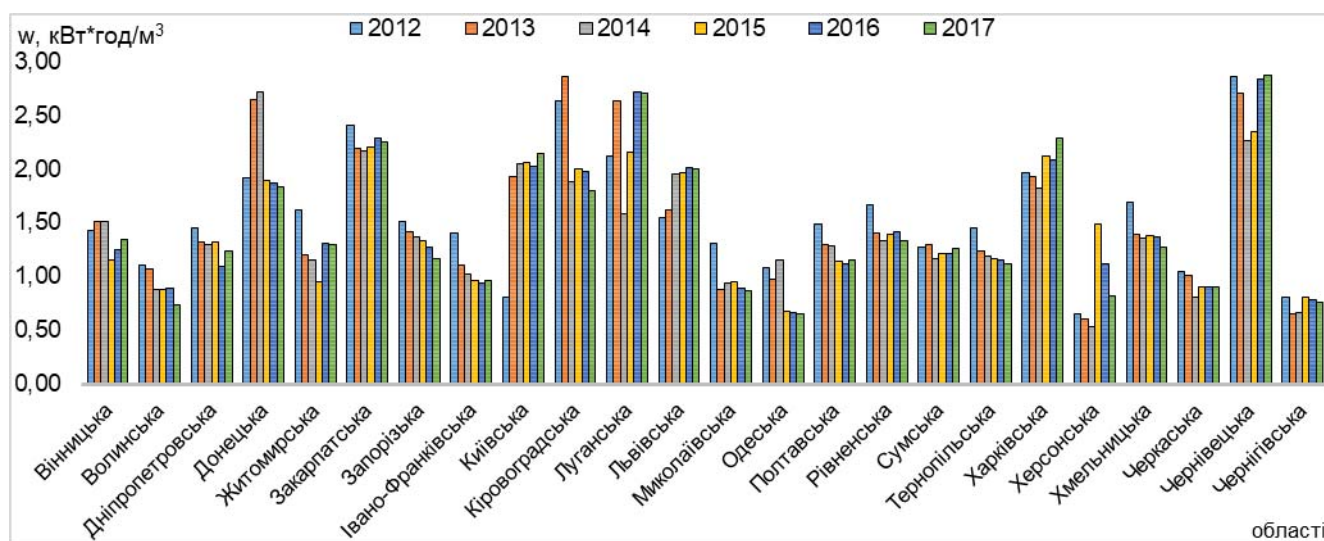


Рисунок 1.7 - Динаміка ефективності електроспоживання на водопостачання ВГ України: а) електроспоживання; б) питоме електроспоживання



а)



б)

Рисунок 1.8 - Динаміка ефективності електроспоживання в ВГ областей України: а) електроспоживання; б) питоме електроспоживання

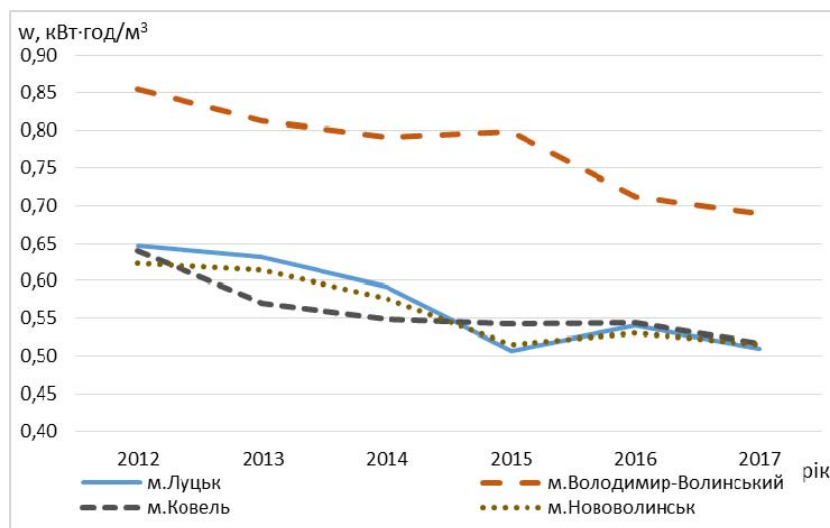


Рисунок 1.9 - Динаміка питомого електроспоживання на водопостачання по підприємствах ВКГ Волинської області

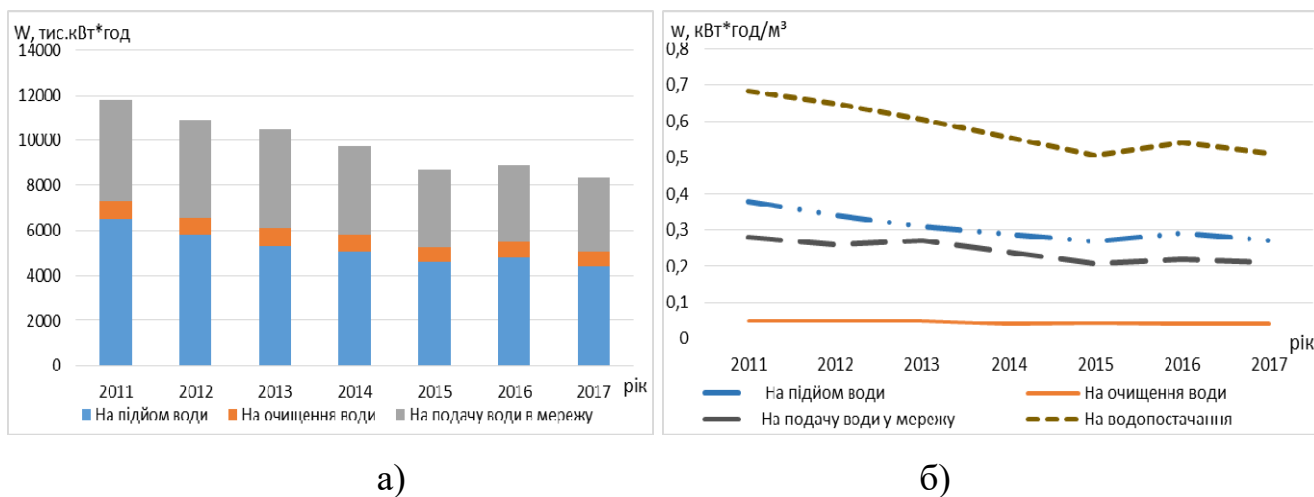


Рисунок 1.10 - Динаміка ефективності електроспоживання на технологічні процеси водопостачання КП «Луцькводоканал»: а) електроспоживання; б) питоме електроспоживання

Проте, витрати води на технологічні потреби та втрати води в мережах водопостачання залишаються високими (рис. 1.11 – 1.13)

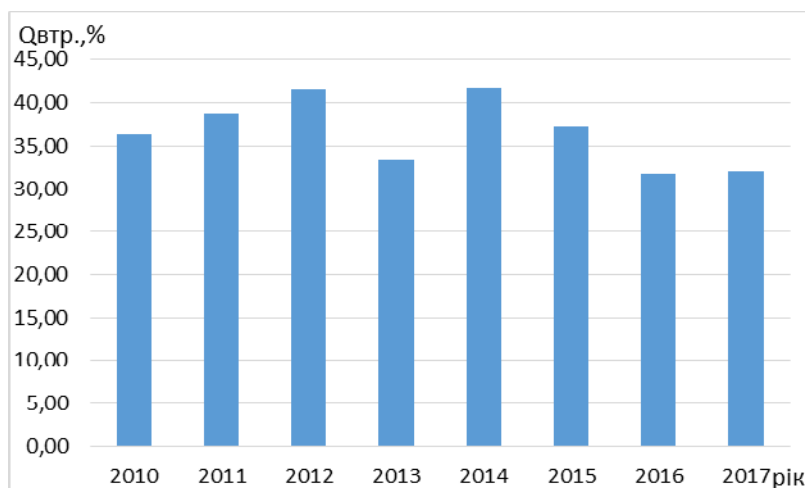


Рисунок 1.11 - Динаміка частки витрат води на технологічні потреби та втрат води від обсягів піднятої води ВГ України

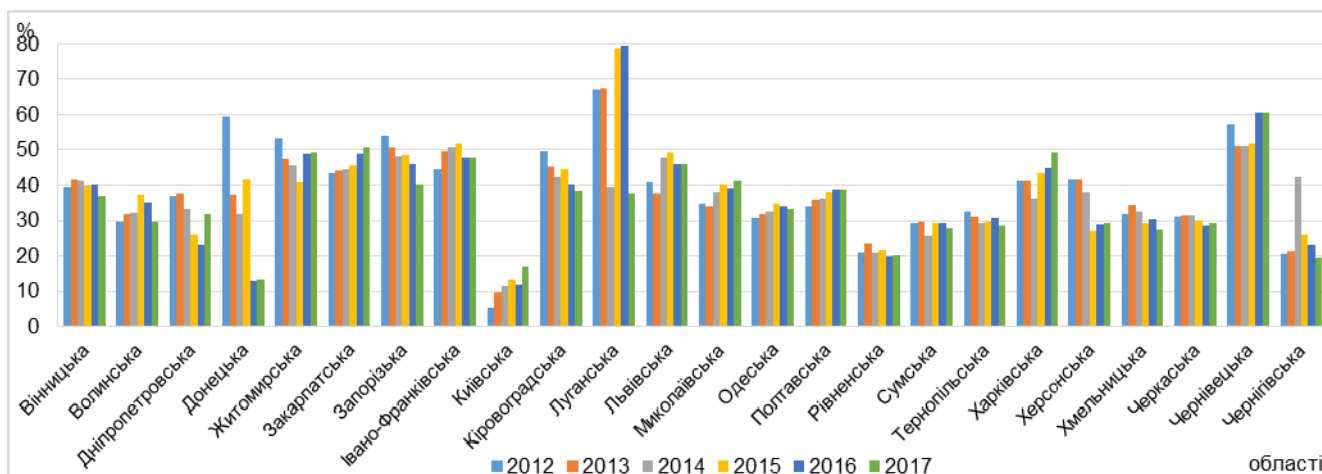


Рисунок 1.12 - Динаміка частки витрат води на технологічні потреби та втрат води від обсягів піднятої води ВГ областей України

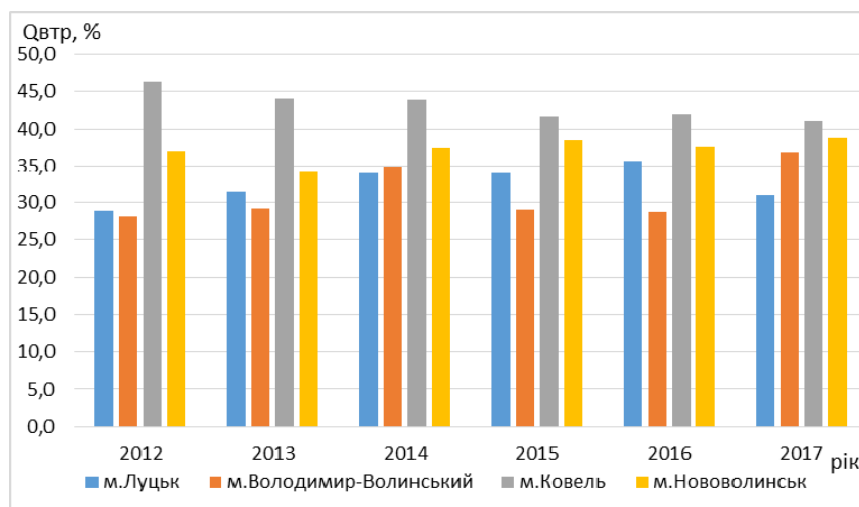


Рисунок 1.13 - Динаміка частки витрат води на технологічні потреби та втрат води від обсягів піднятої води підприємств ВКГ Волинської області

Аналіз наведених результатів дозволяє стверджувати: хоча протягом останніх років в цілому по ВГ України спостерігається тенденція до зниження частки витрат води на технологічні потреби та втрат води в мережі водопостачання, для ВГ окремих областей, а також окремих підприємств має місце її зростання. Аналіз динаміки витрат води на технологічні потреби та втрат води в мережі водопостачання КП «Луцькводоканал» (рис. 1.14) вказує на зменшення витрат води на технологічні потреби, проте таке не можна стверджувати про втрати води в мережі водопостачання. Можна припустити, що причинами значних втрат води є: критичний стан мереж, що зумовлює втрати води через її витоки внаслідок поривів; недостатня організація обліку об'ємів водоспоживання на фоні організації обліку відпущеної споживачам води, що зумовлює зростання необлікованих витрат води; неефективна організація процесу водопостачання в цілому, що зумовлює невідповідність режимів водопостачання та водоспоживання та, як наслідок, надлишкові тиски в диктуючих точках мережі та витоки води.

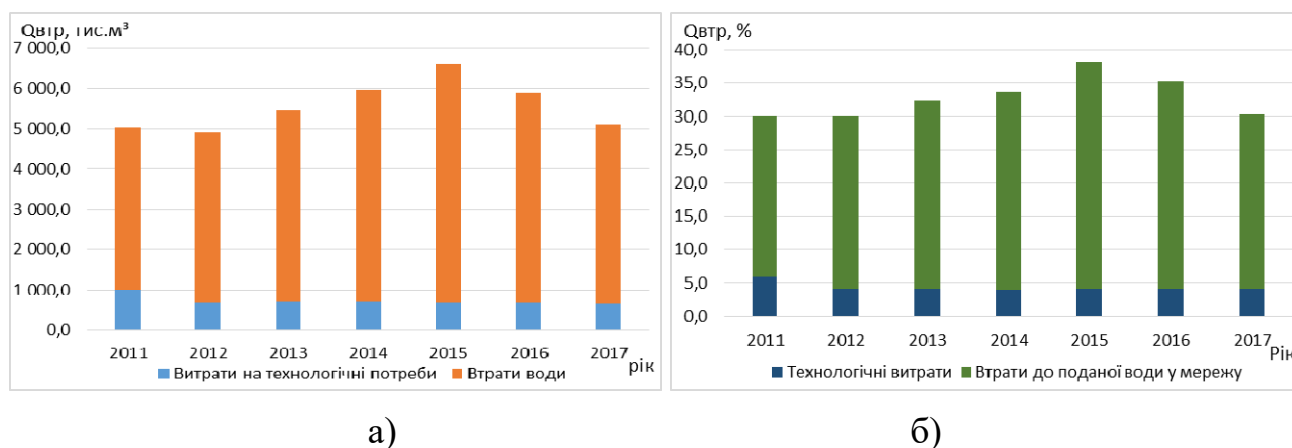


Рисунок 1.14 - Динаміка витрат води на технологічні потреби та втрат води в мережі водопостачання КП «Луцькводоканал»: а) натуральні показники; б) частка від обсягів піднятої води

Аналіз стану ефективності електроспоживання КП «Луцькводоканал» свідчить, що на фоні незначної зміни річних значень виробничих показників водопостачання КП «Луцькводоканал» (рис. 1.15) спостерігається стійка тенденція до зниження витрат електроенергії (рис. 1.16)

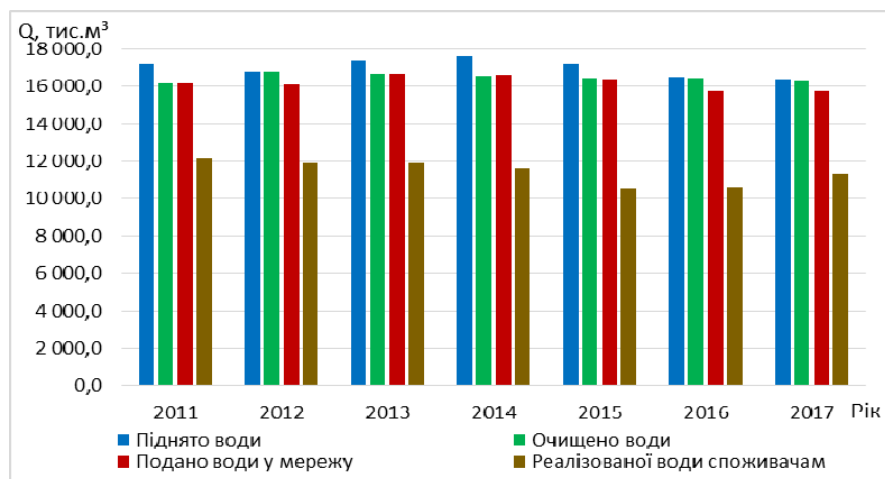


Рисунок 1.15 - Динаміка виробничих показників водопостачання КП «Луцькводоканал»

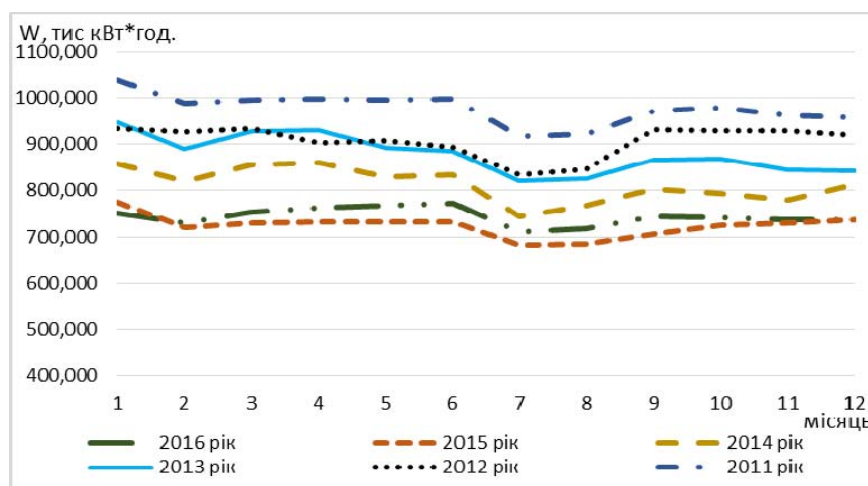


Рисунок 1.16 - Динаміка електроспоживання КП «Луцькводоканал»

Проте, питомі витрати електроенергії на 1 м³ води, поданої в мережу водопостачання, відрізняються впродовж року та впродовж місяця (рис.1.17)

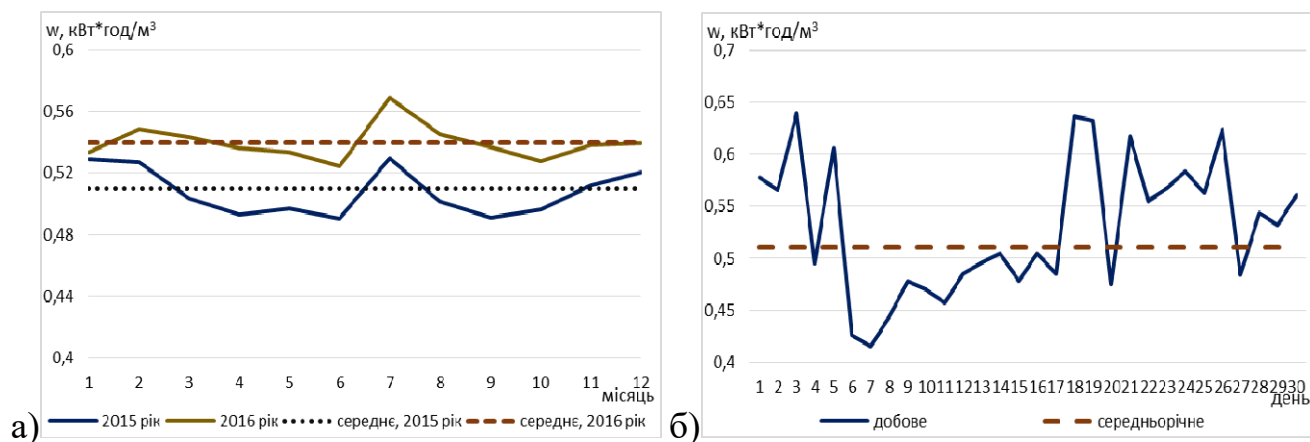


Рисунок 1.17 - Динаміка питомого електроспоживання КП «Луцькводоканал»: а) по місяцях; б) по днях (грудень, 2015 року).

Аналіз динаміки питомого електроспоживання підтверджує припущення про неефективну організацію режиму водопостачання (не достатньо узгодженого з режимом водоспоживання), що призводить до додаткових витрат електроенергії.

1.1.2 Аналіз стану енергоефективності насосних станцій та чинників, що визначають ефективність процесу водопостачання

Серед підсистем, що приймають участь у формуванні енергоефективності СКВ, найбільш значимою є підсистема НС. В НА витрачається 75% ÷ 95% всієї споживаної електроенергії НС [98].

Режими роботи НС істотно залежать від зміни режиму водоспоживання, для якого характерними є значні циклічні (добові, тижневі тощо) зміни. Як правило, на НС встановлюються НА надлишкової потужності для забезпечення пікових навантажень, що зумовлює низьку ефективність електроспоживання [98]. Оскільки під час проектування СКВ не враховувалися коливання режимів водоспоживання, то фактичні значення характеристик режимів роботи НА знаходяться поза робочими зонами їх значень, що призводить до необхідності регулювання гідравлічних параметрів НА [15]. Для приведення режимів водоподачі до режимів споживання води використовують додаткові регулювальні пристрої. Аналіз динаміки питомого електроспоживання впродовж доби (рис. 1.18) вказує на значні перевитрати електроенергії в нічну пору доби.

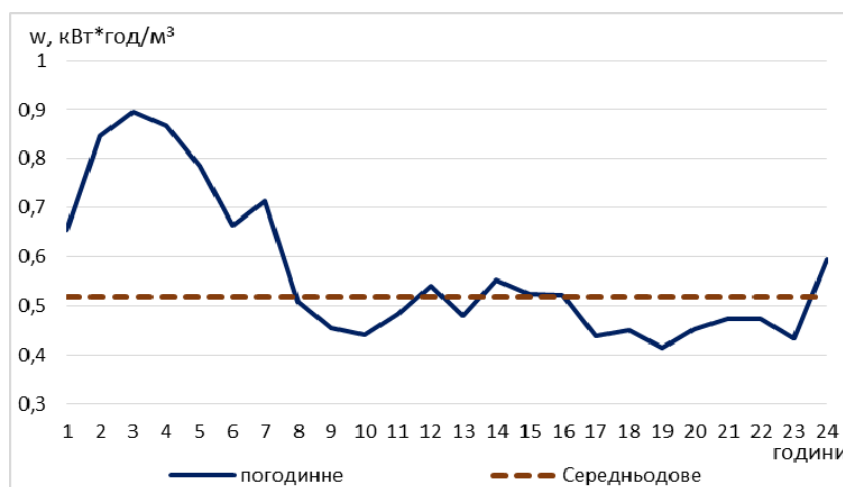


Рисунок 1.18 - Графік погодинного питомого електроспоживання водозабору «Дубнівський» КП «Луцькводоканал» (17.12.2015)

НА, що працюють в змінному режимі протягом доби перевитрачають від 25% до 50% електроенергії [99]. Використання застарілого обладнання НС, відсутність ефективних систем моніторингу та управління НА зумовлює перевитрати електроенергії за умови підтримки надмірно високих тисків в водопровідних мережах, що збільшує ризики аварій. Через значну зношеність обладнання, роботу НА в неоптимальному режимі питомі витрати електроенергії у ВКГ у 2,5 рази перевищують аналогічні показники розвинутих країн світу [89].

Проте, досвід реалізації пілотних енергозберігаючих проектів на підприємствах ВКГ різних міст України свідчить про широкі можливості подолання ситуації, що склалася [100]. Для її вирішення необхідним є використання відповідних методів та підходів щодо підвищення рівня енергоефективності СКВ та її структурних елементів з урахуванням умов та особливостей їх функціонування.

1.2 Загальна характеристика проблеми енергетичної ефективності та тенденцій щодо її забезпечення

1.2.1 Аналіз підходів до оцінювання рівня енергоефективності

Згідно [8] «енергоефективність» означає відношення випуску продукції, послуги, товарів до вхідної енергії. Згідно позиції експертів американського департаменту енергетики енергетична ефективність не може бути виражена єдиним показником [17, 101, 102], тому існує низка підходів до її тлумачення. У Директиві ЄС [9] зазначено, що на рівні країн-членів енергоефективність може бути виражена у первинному, або кінцевому споживанні енергії; первинному, або кінцевому енергозбереженні, або ж енергоємності продукції. Отже, енергоефективність – це сукупність понять, визначена постановкою задачі дослідження та ієрархічним рівнем розгляду проблеми. Систематизацією різних підходів до поняття енергоефективності слід вважати її визначення, наведене у міжнародному стандарті ISO 50001:2011 [103], його другій редакції ISO 50001:2018 [104] та державному стандарті ДСТУ ISO 50001:2014 [105], згідно якого термін «енергоефективність» означає «співвідношення (коефіцієнт) або інший кількісний взаємозв'язок між

отриманим результатом (вихідним показником), тобто між виконаною роботою, послугами, товарами чи енергією і вхідним показником, тобто вхідним рівнем енерговитрат». Отже, енергоефективність трактується як характеристика якості будь-якого технологічного процесу з позицій використання енергоресурсів.

Енергоефективності є властивою: цілісність - обумовлена конкретністю показника рівня енергоефективності, що використовується; багатовимірність – обумовлена багатовимірністю простору, результатів витрат енергоресурсів та показників ефективності цих витрат; взаємозв'язність – обумовлена змінами показників енергоефективності залежно від зміни тих або інших умов та станів об'єкту дослідження. Всі параметри об'єкту дослідження взаємопов'язані та взаємообумовлені. Зміна одних параметрів або характеристик зумовлює зміну інших. Підвищення ефективності по одній із задач зумовлює підвищення ефективності системи або її структурних елементів по одній або декількох інших цільових задачах.

Враховуючи те, що енергетична ефективність виробництва становить одну з основних складових загальної ефективності, оцінка її по регіонах, підприємствах, технологічних процесах дозволяє виявити резерви підвищення ефективності функціонування підприємств [1, 14] та галузі в цілому. Кількісні оцінки енергоефективності необхідні для вирішення питань щодо впровадження організаційних та технічних заходів з підвищення рівня енергоефективності.

На питаннях оцінки енергоефективності зосереджена діяльність МЕА в рамках Організації економічного співробітництва та розвитку для виконання міжнародної енергетичної програми. Відповідно до думки експертів МЕА оцінка енергоефективності приймає різні форми, має різні призначення і області застосування. Враховуючи комплексний характер поняття «енергозбереження» та той факт, що енергозбереження формується та розвивається на стикові кількох науково-технічних, економічних та організаційних напрямків, методи та підходи до визначення системи показників енергоефективності та оцінювання рівня ефективності енергоспоживання є різноманітними [18]. Фізичні методи засновані на даних про енергоспоживання на підприємстві, включаючи сумарне споживання енергії та його розподіл по окремих об'єктах. Порівняння фактичних значень енергоспожи-

вання з базовими і нормативними значеннями дозволяє виявити основні відхилення і провести первинну оцінку енергоефективності. При цьому слід визначити фактори, які впливають на енергоспоживання, та виявити найменш ефективні з точки зору енергоспоживання об'єкти і системи. Методи економічного аналізу дозволяють розрахувати втрати від нераціонального використання ПЕР і виробити конкретні рекомендації з підвищення рівня енергоефективності [106].

Під класичним підходом до оцінювання енергоефективності розуміють використання критеріїв ефективності енергоспоживання, отриманих на основі показників енергоефективності, які дають змогу порівняти рівень ефективності споживання енергоресурсів в агрегатах, технологічних процесах, підприємствах, в галузях промисловості, регіонах [107]. Енергетичні показники та характеристики визначають систему координат, в рамках якої формулюються та аналізуються заходи з енергозбереження. В загальному випадку це складний багатофакторний процес. Основне призначення більшості показників – оцінка енергоефективності виробництва товарів і послуг у загальному розумінні цих понять. Тому широко використовуються такі поняття, як енергоємність товарів, робіт і послуг, загальні та часткові витрати видів ПЕР, рівні втрат [108]. Значна частка показників належить до сфери нормування ПЕР. Традиційний підхід до оцінки енергоефективності полягає в аналізуванні питомих витрат енергоресурсів на підприємствах, цехах, виробництвах; енергоємності та ККД технологічних процесів [23], установок та виробництва в цілому [109]. Проте не існує єдиної теоретичної та методологічної бази визначення та аналізу показників енергоефективності на різних ієрархічних рівнях, а існуючі напрацювання стосуються лише окремих аспектів цієї проблематики, наприклад, виключно макроекономічного рівня або лише рівня технологічних процесів [102]. Також існує проблема відсутності або не в повній мірі узгодженості інформації в статистичних даних (що публікує Державний комітет статистики України) з підходами, що використовуються світовими організаціями, необхідної для розрахунків показників енергетичної ефективності.

Оцінка ефективності енергоспоживання може здійснюватися як на основі кількісних, так і якісних методів, застосування яких передбачає здійснення бага-

тофакторного аналізу енергоефективності. При цьому постає питання корекції та узгодження похибок, які виникають через суб'єктивність оцінок експертів [110]. Кількісна оцінка характеризується двома основними групами показників [110]: відносна кількісна оцінка, яка є певним показником енергоефективності, що вимагає порівняння з іншими показниками, прийнятими як еталон; абсолютна кількісна оцінка, яка характеризує витрати енергії, або інші чинники, які є істотними з точки зору ефективності енергоспоживання. Системна оцінка енергоефективності складної технологічної системи (СТС), якою є будь-яка галузь, підприємство, технологічний процес тощо, передбачає оцінювання за всіма складовими ефективності енергоспоживання. Декомпозиційна оцінка виконується окремо за напрямками енергоефективності СТС, її складових та елементів. При цьому пропонується спочатку виконати декомпозицію системи на складові (підсистеми) від вищого рівня ієрархії до нижчого рівня (окремі агрегати), визначити критерії, за якими можна оцінити енергоефективність цих складових, а потім послідовно оцінювати загальну ефективність системи, починаючи з нижніх рівнів і до верхнього [54].

Одним із базових інструментів аналізу енергоефективності є побудова паливно-енергетичних балансів (ПЕБ) використання ПЕР. Аналіз ПЕБ полягає в якісній та кількісній оцінках стану енергоспоживання та використання енергоресурсів, дозволяє виявити відмінності в рівнях ефективності енергоспоживання порівняно з аналогічними підприємствами та намітити шляхи зміни структури енергобалансу для уточнення питомої витрати енергії на виробництво продукції. На даний момент накопичено достатньо методичного матеріалу щодо складання та аналізу ПЕБ [111-115]. Аналіз енергоспоживання здійснюється шляхом порівняння фактичних показників з нормативними, фактичними за минулий рік, аналогічними на інших підприємствах. Таке порівняння вимагає виконання умов співставлення, що ускладнює використання даного підходу для оцінювання рівня енергоефективності підприємств, умови функціонування яких є відмінними. Крім того, є ряд недоліків самого ПЕБ [116]: ПЕБ фіксує сформовані на момент складання підсумків діяльності і є застарілим для наступного моменту; ПЕБ характеризує стан об'єкту в певний період часу, але не пояснює причин такого стану; дані статис-

тичної звітності дають змогу розрахувати низку аналітичних показників, однак це не забезпечує їх просторової та часової порівнянності.

Іншим напрямком є розробка та втілення у практику механізму «контролю і нормалізації» [117], в основу якого покладено метод виявлення витрат, що можуть бути усунені. Його суть полягає в порівнянні даних про фактичний рівень енергоспоживання з рівнем енергоспоживання, який відповідає ефективному використанню енергії та який вже був досягнутий в минулому для конкретного об'єкту в конкретних умовах [118]. Такий підхід є основою урахування фактичних умов функціонування конкретного підприємства та спрямований на удосконалення процесу енергоспоживання об'єкту дослідження.

Слід зазначити, що не існує ідеального і загальновизнаного методу, що застосовується до всіх випадків [119]; не існує комплексних показників енергоефективності, які б відрізняли одне підприємство від іншого як за зовнішніми, так і за внутрішніми параметрами (показниками енергоспоживання, методами організації та управління режимом роботи і режимом енергоспоживання). З точки зору енергоефективності кожне підприємство володіє специфічними особливостями [119]. Оцінка рівня енергоефективності кожного конкретного підприємства або галузі потребує індивідуальної методики аналізу і залежить, в першу чергу, від особливостей технологічних процесів. Набір показників, що включаються в систему оцінки рівня енергоефективності, для кожного підприємства необхідно уточнювати, беручи до уваги масштаби виробництва, а також особливості технологічних процесів [18, 23, 30, 54, 120]. Для різних областей застосування можуть використовуватись різні показники енергоефективності, сукупність яких може дати правильне уявлення про стан справ на об'єкті дослідження. Важливо, щоб на кожному рівні підприємства були розроблені і впроваджені свої показники енергоефективності. Тому виникає потреба пошуку підходу та розробки методів оцінювання рівня енергоефективності, які б забезпечували можливість комплексного урахування всіх аспектів проблеми енергоефективності, сприяли виявленню причин неефективного енергоспоживання, недоліків в організації технологічного процесу та управлінні режимом роботи вибраного об'єкту дослідження.

1.2.2 Тенденції та вимоги щодо забезпечення енергоефективності та підвищення її рівня

Питання підвищення рівня енергоефективності мають комплексний характер та стосуються всіх учасників процесу енергоспоживання й різних сфер діяльності [121]. Поняття енергоефективності країни являє собою сумарну енергоефективність регіонів, міст, галузей, промислових підприємств, технологічних процесів, обладнання та окремих агрегатів. Кожен вищий рівень енергоефективності складається із сумарної енергоефективності підрівнів [120]. Тобто енергоефективність можна представити у вигляді ієрархічної піраміди, починаючи з нижчого рівня до вищого: рівень агрегату, структурного елементу; рівень підприємства; рівень області (міста); рівень регіону; рівень держави (галузі). Підвищення рівня енергоефективності галузі на рівні держави залежить від організації та підтримки діяльності у сфері енергоефективності в регіонах, на конкретних підприємствах і технологічних процесах [120] та є можливим за умови використання сукупності технологічних, технічних і організаційних заходів, направлених на ефективне використання ПЕР під час виробництва продукції, скорочення втрат енергоресурсів.

Посилення ролі і значення ефективності використання енергоресурсів висуває в число першочергових проблему підвищення дієвості управління процесом енергоспоживанням. Його основним завданням є досягнення високого рівня енергоефективності виробництва, яке має ґрунтуватися не тільки на технічних рішеннях, але й на досконалому управлінні [122] на державному та регіональному рівні, а також на рівні підприємств, окремих технологічних процесів чи енергоємних установок [123]. В країнах ЄС енергоефективність досягається не лише за рахунок впровадження нових енергозберігаючих технологій, а й за рахунок змін у методах і способах управління. Досвід європейських країн свідчить, що впровадження політики енергоефективності вимагає змін на рівні управлінських рішень шляхом впровадження СЕМ відповідно до вимог стандартів серії ISO 50000 [103-105].

В [12], документі, який окреслює стратегічні орієнтири розвитку паливно-енергетичного комплексу України на період до 2035 року, серед пріоритетів зазначено необхідність формування свідомого та енергоефективного суспільства, в

тому числі, шляхом: впровадження на державному і муніципальному рівнях, а також на підприємствах, та постійне вдосконалення СЕМ відповідно до вимог стандартів та міжнародних угод; забезпечення повноти та прозорості обліку та контролю споживання всіх форм енергії та ПЕР (електро- та теплоенергоносіїв, природного газу тощо).

Згідно [124] серед ключових принципів забезпечення енергоефективності відзначено наступне: розробка та впровадження СЕМ; системний підхід до забезпечення енергоефективності (облік всіх значущих аспектів і взаємозв'язків між процесами і установками, що функціонують на підприємстві); виявлення можливостей зниження енергоспоживання та ключових аспектів забезпечення енергоефективності; визначення показників енергоефективності, їх оцінка, перегляд і вдосконалення; порівняльний аналіз або бенчмаркінг (порівняння з найкращими досягнутими результатами); послідовне вдосконалення енергоефективності (поетапне досягнення кращих показників); розробка та впровадження методів вдосконалення енергоефективності, включаючи моніторинг і контроль.

1.3 Огляд сучасних інструментів ефективного управління енергоспоживанням та їх призначення для підвищення рівня енергоефективності складних технологічних систем

1.3.1 Концепція бенчмаркінгу енергоефективності як інструмент пошуку кращих практик енергоефективності

Енергоефективність - це комплексна категорія, для якої складно розрахувати узагальнений показник. Аналіз енергетичної ефективності СТС та її об'єктів без необхідності узагальнення показників енергоефективності, а лише на підставі виявлених їх еталонних значень, є можливим за умови використання процедур порівняльного аналізу – концепції бенчмаркінгу, яка полягає в поширенні передового досвіду та кращих досягнень в цій сфері у промисловості та серед підприємств з різними видами діяльності і будь-якої форми власності [125].

У загальному розумінні бенчмаркінг - це процес пошуку ефективнішого

об'єкту з метою порівняння з власним, переймання кращих методів роботи, визначення та адаптації наявних прикладів ефективного функціонування для поліпшення власної роботи, виявлення шляхів для досягнення підвищення ефективності виробництва шляхом систематичного аналізу методів роботи різних об'єктів [126], що є подібними за напрямком діяльності або структурою.

Бенчмаркінг енергоефективності є особливим типом бенчмаркінгу діяльності, сфокусованим на ефективності використання та споживання енергії [127]. Він представляє собою [128, 129] збір та аналіз інформації з метою оцінювання та порівняння ефективності використання ПЕР різних об'єктів або різних структурних елементів в межах одного складного об'єкту, оцінку інформації про енергоспоживання кращих об'єктів та про методи управління процесами, що ними використовуються. Згідно [129] мета бенчмаркінгу енергоефективності - визначення відповідних даних та показників енергоспоживання (як технічних, так і стосовно режимів роботи), на основі порівняння якісних та кількісних результатів, досягнутих групою об'єктів дослідження. Головним принципом бенчмаркінгу є «від кращого до найкращого». З огляду на це, бенчмаркінг енергоефективності слід розглядати як процедуру планомірного вивчення кращих практик ефективності енергоспоживання у технологічній системі з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження, порівняння його характеристик енергоефективності з еталонними зразками для впровадження досягнень інших об'єктів у групі однотипних [63].

Бенчмаркінг використовується з метою удосконалення діяльності через розуміння методів і способів дій, що вимагаються для досягнення високого рівня ефективності. За допомогою бенчмаркінгу стає можливим оцінити динаміку характеристик енергоефективності об'єкту дослідження порівняно з іншими аналогічними об'єктами та виробити підходи до поліпшення своїх характеристик, орієнтуючись на кращі аналоги. Досвід провідних країн Західної Європи та США вказує на доцільність застосування бенчмаркінгу для виявлення «кращих» об'єктів та їх структурних елементів згідно визначених критеріїв [125].

У європейському та державному стандартах з бенчмаркінгу [128, 129] та стандартах серії ISO 50001 [103, 105] застосування бенчмаркінгу не розглядається

як обов'язкова вимога. Проте згідно Додатку А до ISO 50001 [103, 105] бенчмаркінг розглядається як один з інструментів підтримки і безперервного покращення діяльності у сфері енергозбереження. Результати бенчмаркінгу можуть надати інформацію для виконання об'єктивного енергоаналізу, формулювання енергоцілей і енергозадач. Бенчмаркінг слід розглядати як невід'ємну частину планування процесу енергоспоживання, аналізу та оцінки його ефективності, а також як інструмент управління для безперервного поліпшення [127].

На відміну від звичайного порівняння енергоспоживання підприємства з іншими підприємствами бенчмаркінг енергоефективності передбачає організований і систематичний пошук шляхів вирішення проблем для забезпечення ефективного енергоспоживання, їх чіткого деталізування і структурування, виявлення сильних і слабких сторін [125]. Він надає інформацію про діяльність підприємств і галузі в цілому для прийняття обґрунтованих рішень; дозволяє знайти стратегії і практики, які допомогли певному об'єкту досягти результатів у сфері підвищення рівня енергоефективності. Згідно рекомендацій [130] бенчмаркінг енергоефективності проводиться для визначення та спостереження за динамікою рівня енергетичної ефективності об'єктів; визначення цілей у підвищенні рівня енергоефективності; забезпечення поінформованості об'єктів одного класу щодо заходів з підвищення рівня енергоефективності.

Наявність в легкому доступі результатів бенчмаркінгу мотивує до реалізації заходів з підвищення енергоефективності. І навпаки, відсутність можливості порівнювати показники енергетичної ефективності обмежує мотивацію до пошуку шляхів підвищення енергоефективності.

Слід зазначити, що для забезпечення повноцінного бенчмаркінгу енергоефективності необхідний чітко вироблений регламент для консолідації і обробки даних щодо енергоспоживання та характеристик його ефективності, процедур їх порівняння та механізмів узагальнення отриманих результатів для вироблення висновків і рекомендацій.

1.3.2 Роль енергоменеджменту у забезпеченні енергоефективності технологічних систем та їх об'єктів

Згідно [105] ЕМ – діяльність, спрямована на забезпечення раціонального використання ПЕР, яка базується на отриманні енерготехнологічної інформації за допомогою обліку, енерготехнологічних вимірювань і перевірок, аналізу ефективності споживання ПЕР, та впровадженні енергозберігаючих заходів. ЕМ забезпечує постійне дослідження інформації, а отже, знання про розподіл та рівні споживання енергії на підприємстві [131]. З позицій управління технологічним об'єктом або процесом як споживача енергетичних ресурсів метою ЕМ є досягнення бажаного стану енергоспоживання на об'єкті з точки зору забезпечення з енергоефективності. Одним із завдань ЕМ є комплексний аналіз енергоспоживання, що включає облік, контроль, аналіз і мінімізацію споживання ПЕР за рахунок заходів з енергозбереження [132]. Отже, ЕМ слід розглядати як комплекс організаційно-технічних заходів, що сприяють підвищенню ефективності використання ПЕР.

На практиці ЕМ розглядається на макро- і мікрорівні [132]. ЕМ макрорівня відображає управління споживанням ПЕР на державному, галузевому, регіональному рівнях. ЕМ мікрорівня визначає управління енергоспоживанням на рівні підприємства. Кожному з рівнів відповідають свої конкретні цілі, зокрема [132]: галузевий ЕМ розглядає питання підвищення енергоефективності підприємств галузі та галузі в цілому, за умови незмінного споживання ПЕР, а ЕМ промислового підприємства спрямований на зниження питомих енергетичних витрат у загальній структурі витрат.

Міжнародний досвід показує, що застосування ЕМ може забезпечити зниження витрат на енергоресурси до 30% [133]. Концепція ЕМ передбачає управління споживанням енергоресурсів в такому ж обсязі, як і будь-яким іншим виробничим ресурсом для зменшення частки енерговитрат за рахунок підвищення енергоефективності. Отже, ЕМ слід розглядати як частину системи управління, основним завданням якої є управління ефективністю споживання ПЕР [105], а ключовим елементом такого управління енергоспоживанням та забезпечення високого рівня енергоефективності згідно [124] є створення СЕМ. Об'єктом управ-

ління в СЕМ є сукупність технологічного та енергетичного обладнання, а також режими їх роботи та процеси споживання енергоресурсів [134].

З урахуванням різних точок зору в галузі ефективного управління енергоспоживання [7, 117, 131-141] виділяють такі основні завдання СЕМ підприємства: організація оперативного контролю енергоспоживання; визначення базового рівня енергоспоживання (БРЕ); діагностика причин відхилення фактичного енергоспоживання від базового; прогнозування енергоспоживання і прийняття оперативних управлінських рішень, що забезпечують його зниження; постійне поліпшення технологічного процесу для підвищення енергоефективності; визначення пріоритетів для впровадження нових енергозберігаючих технологій та обладнання тощо.

СЕМ представляє собою комплекс організаційних і технічних засобів та програмно-методичного забезпечення, які в сукупності дозволяють так управляти технологічним процесом, щоб споживалася мінімально необхідна кількість ПЕР для виробництва продукції або послуг, а її складовими є не лише прилади обліку, а й набір процедур перевірок та вимірювань, алгоритмів розрахунку та аналізу характеристик енергоефективності.

Впровадження СЕМ покликане забезпечити поліпшення енергетичних характеристик [105] (рівня досягнутої/досяжної енергоефективності вираженого в одиницях енергоспоживання, питомого енергоспоживання, показників енергоефективності) шляхом розробки керуючих дій на основі зіставлення результатів вимірювань із запланованими показниками та БРЕ [43, 143].

1.3.3 Енергетичне планування та енергетичний аналіз

Енергетичне планування є першим етапом циклу Демінга PDCA: Плануй (Plan) - Виконуй (Do) - Перевірй (Check) - Дій (Act), який згідно стандарту ISO 50001 [103-105, 137] є основою ЕМ, і спрямоване на постійне поліпшення енергетичної результативності. Енергопланування передбачає ідентифікацію основних характеристик енергоспоживання об'єкту, БРЕ, основних показників енергоефективності; цільових значень показників [104, 105, 144].

Однією з складових енергетичного планування є енергетичний аналіз. Від-

повідно до стандарту ISO 50001 [103-105] енергетичний аналіз – це аналіз енергетичної ефективності, використання ПЕР і споживання енергії на основі збору, аналізу та оцінки даних та іншої інформації, що веде до виявлення областей значного використання енергії і дозволяє ідентифікувати можливості для поліпшення енергетичних характеристик. Енергетичний аналіз є важливим інструментом формування інформаційно-аналітичної бази ЕМ у сфері енергоефективності. Метою енергетичного аналізу є оцінка динаміки та ефективності споживання енергетичних ресурсів, виявлення непродуктивних втрат, ідентифікація резервів підвищення енергоефективності підприємства. Його результати є основою висновку про рівень енергоспоживання та рівень енергоефективності.

Проведення енергетичного аналізу спрямоване на дослідження минулого і сьогодення в споживанні енергоресурсів з урахуванням всіх даних, що впливають на енергоспоживання, та покликане забезпечити згідно [105] розуміння процесу використання та споживання енергії, оцінку його ефективності; ідентифікацію на основі отриманої інформації суттєвого використання енергії; виявлення чинників, від яких залежить споживання енергії, а також тенденцій, сезонних коливань тощо для урахування циклічних змін технологічного процесу під час оцінки майбутнього використання та споживання енергії. Результатом енергетичного аналізу є інформація та дані, необхідні для встановлення БРЕ – опорної величини для вимірювання та порівняння рівня досягнутої/досяжної енергоефективності у довгостроковій перспективі [144]. При цьому, у випадку, коли відбулись значні зміни у технологічних процесах, а також показники енергетичної ефективності більше не відображають реальний стан використання та споживання енергетичних ресурсів промисловим підприємством, БРЕ повинен бути відкоригованим [105].

1.3.4 Моніторинг ефективності енергоспоживання та його роль у формуванні інформаційної бази для підвищення рівня енергоефективності

В загальному випадку, моніторинг трактують як систему заходів для спостереження та контролю, що певним чином проводяться для оцінювання стану об'єкту дослідження, аналізу процесів, що відбуваються, та своєчасного виявлен-

ня тенденцій його зміни. Згідно [145] енергетичний моніторинг - комплекс заходів (спостережень, оцінок, прогнозів), що дає змогу неперервно спостерігати за режимом споживання ПЕР у технологічній системі, реєструвати його основні показники, оперативно виявляти результати впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на ефективність енергоспоживання.

Моніторинг ефективності енергоспоживання – одна з складових ЕМ, заснована на зборі певної інформації про об'єкт дослідження та спрямована на перевірку дотримання правил та режимів енергоспоживання, виконання запланованих заходів, дотримання встановлених значень енергетичних показників [146]. Отримання достовірної та доступної для спостереження інформації як щодо обсягів енергоспоживання, так і щодо характеристик технологічних процесів забезпечують вимірювання, які є важливою частиною етапу «перевірки» в циклі Демінга [105, 131, 142]. Збір таких даних пов'язаний з аналізом споживання енергії і передбачає виявлення факторів, що впливають на ефективність енергоспоживання; встановлення залежностей між обсягами споживання енергії та цими факторами; виявлення часових, просторових і групових тенденцій у енергоспоживанні; формування звітів і прогнозів щодо енергоспоживання. Оскільки будь-яка технологічна система, технологічний процес функціонує в конкретних умовах та зазнає не лише внутрішніх, а й зовнішніх впливів, то окрема увага повинна бути приділена моніторингу чинників зовнішнього середовища [25, 38, 68]. Отже, моніторинг ефективності енергоспоживання - це система збору, накопичення та зберігання даних щодо обсягів спожитої енергії, основних характеристик технологічних, експлуатаційних і зовнішніх чинників, що мають вплив на енергоспоживання. Проведення моніторингу передбачає виявлення на основі отримання оперативної інформації відхилень від граничних значень показників та цільових індикаторів [123], визначення ефективності впровадження енергозберігаючих заходів та технологій, досягнення запланованих завдань по економії енергії, мінімізацію негативних наслідків та підвищення рівня ефективності енергоспоживання.

Наявність необхідної інформації, яка відповідає вимогам повноти, достовірності та своєчасності, забезпечує можливість ефективно здійснювати планування,

організацію виконання, контроль і управління технологічними процесами, режимом енергоспоживання технологічних установок та технологічної системи в цілому. Отже, моніторинг ефективності енергоспоживання технологічної системи слід розглядати як складову управлінської діяльності, що передбачає спостереження за станом, параметрами та характеристиками об'єкту дослідження з метою формування інформаційної бази щодо його поведінки та обслуговування процесів оцінювання розвитку тенденцій у енергоспоживанні у технологічному процесі з урахуванням особливостей функціонування його складових, підготовки і прийняття обґрунтованих управлінських рішень для запобігання розвитку негативних тенденцій у енергоспоживанні. Своєчасність подання всієї необхідної інформації на всіх рівнях виробництва є одним з факторів, що дозволяють підвищити рівень енергоефективності, обґрунтованість та актуальності прийнятих рішень.

1.3.5 Контроль ефективності енергоспоживання та його призначення для оперативного управління енергоспоживанням

Контроль ефективності споживання енергії є однією з складових управління енергоспоживанням. Аналіз його результатів є основою рішень щодо наявності (відсутності) тенденцій до покращення рівня енергоефективності та удосконалення СТС. В загальному випадку, контроль енергоефективності – це процес забезпечення досягнення поставлених цілей шляхом постійного спостереження за ефективністю функціонування технологічної системи та усунення відхилень, що виникають. Практика побудови СЕМ свідчить, що для вирішення задачі оперативного контролю та аналізу ефективності енергоспоживання необхідною є побудова і використання системи оперативного управління ефективністю використання ПЕР [147, 148], яка являє собою сукупність так званих систем контролю і планування енергоспоживання (КиП). Системи КиП - це техніка управління, яка використовує енергетичну інформацію як основу для контролю та зменшення поточного рівня енергоспоживання, вдосконалення існуючих операційних процедур. Вона будується за принципом «ти не можеш керувати тим, що не вимірюєш». Будучи корисним інструментом для управління енергоспоживанням, КиП використовується в

багатьох галузях і активно підтримується агентствами державного управління енергозбереженням та міжнародними агентствами розвитку [117].

В основі побудови системи КіП є виявлення залежності обсягу енергоспоживання на об'єкті від значень низки виробничих і технологічних параметрів (показників), які суттєво впливають на нього, тобто, БРЕ [142], порівняно з якими й визначається рівень досяжної/досягнутої енергоефективності на об'єкті [103-105]. Контроль базується на постійному порівнянні фактичного та прогнозного значень енергоспоживання. Система контролю регулярно фіксує споживання енергії та його відхилення від БРЕ, які можуть бути локалізовані, а аналіз енергоефективності показує, які енергетичні аспекти і процеси повинні бути покращені [123, 139, 140]. За результатами контролю здійснюються управлінські впливи на об'єкт для коригування його функціонування. Система контролю також оцінює результати управління та енергоефективність і виявляє помилки і сфери, які потребують вдосконалення. Отже, впровадження системи контролю як складової СЕМ є одним із засобів постійного удосконалення СТС.

Системи КіП, створені на виробничо-господарських об'єктах країн ЄС, стали логічним розвитком багаторічної практики періодичного проведення аналізу ситуації у сфері споживання палива та енергії [149]. Методологія побудови традиційних систем КіП універсальна, що дозволяє застосовувати їх для оперативного контролю ефективності використання будь-якого виду палива або енергії і на різних об'єктах з метою підвищення його рівня енергоефективності.

1.4 Завдання щодо забезпечення ефективного управління енергоспоживанням та підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства та його об'єктів

1.4.1 Аналіз існуючого стану вирішення проблеми

Сучасна концепція ЕМ стимулює появу та розвиток методологічного та нормативно-методичного забезпечення для вирішення задач контролю, обліку, аналізу ефективності енергоспоживання [122]. Основи енергоефективності, загальні

принципи її підвищення викладено в [118]. Вагомим внеском у розвиток принципів забезпечення ефективного управління енергоспоживанням є низка праць, в яких висвітлено і науково обґрунтовано значний комплекс питань, в тому числі, основи і методологія ЕМ, мета, завдання, структура, роль і місце ЕМ в системі управління підприємством, проблеми його розвитку та практичного застосування в умовах України [117, 138, 148, 150, 151]; питання організації СЕМ на промислових підприємствах [131, 141], підприємствах комунального теплопостачання [152], громадських будівель та бюджетних установ [138, 146, 153]; питання інформаційного забезпечення ЕМ та моніторингу енергоефективності [123, 154-161]; оперативного контролю енергоефективності та організації систем КіП [139, 140, 149, 162-169]; формування моделей енергоспоживання, що представляють БРЕ [147, 170-178].

Систематизацією наукових напрацювань щодо впровадження СЕМ є введення в дію міжнародного стандарту ISO 50001 [103, 104], в якому викладена загальна ідеологія СЕМ, та прийняття низки державних стандартів, гармонізованих з міжнародними стандартами серії ISO 50000 [105, 142, 144, 179].

Разом з тим прийняті стандарти носять загальний характер. У них відсутня деталізація висвітлених питань для підприємств конкретних галузей з урахуванням специфіки технологічного процесу. Не зважаючи на значну кількість публікацій, відсутні спеціалізовані методичні рекомендації щодо здійснення енергетичного планування, організації процедур моніторингу та контролю ефективності енергоспоживання на підприємствах ВГ, які б враховували особливості організації технологічного процесу; потребують вивчення та систематизації питання формування наборів визначальних змінних, які впливають на енергоспоживання, їх урахування для визначення БРЕ та побудови моделей енергоспоживання конкретних об'єктів (в тому числі, водопостачання) для вирішення задач контролю ефективності енергоспоживання; принципи інформування енергоменеджера про результати контролю, їх практичного застосування тощо.

Потреба систематичного управління енергоспоживанням на всіх ієрархічних рівнях СТС зумовлює необхідність запровадження у методології ЕМ високого

ступеню деталізації, контролю енергоефективності не лише СТС в цілому, а й її структурних елементів і технологічних процесів, а також оперативного реагування на погіршення ефективності енергоспоживання [142, 144]. Це вимагає удосконалення існуючих та розроблення нових процедур реалізації завдань щодо оцінювання рівня енергоефективності, планування та контролю електроспоживання об'єктів та їх інтеграції в СЕМ підприємства. При цьому необхідно враховувати ієрархічний рівень та специфіку функціонування об'єкту.

Згідно рекомендацій МЕА стосовно політики підвищення енергоефективності в різних секторах важливо забезпечити в комплексі спостереження, контроль, реалізацію та оцінку заходів щодо підвищення рівня енергоефективності. Одним із завдань, прописаних в «Дорожній карті» проекту реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2035 року [12] є створення системи збору, аналізу та використання даних про кінцеве енергоспоживання для формування порівняльної бази щодо його ефективності співставної із міжнародною практикою.

У світлі сучасних тенденцій, в тому числі, обумовлених в стандарті ISO 50001, науковцями присвячено багато уваги питанню застосування концепції бенчмаркінгу енергоефективності для вирішення питань підвищення енергоефективності, зокрема: методологічним аспектам бенчмаркінгу [125, 180-182], практичного застосування бенчмаркінгу енергоефективності [127, 130], оцінювання рівня енергоефективності різних галузей та їх об'єктів шляхом застосування показників та індексів, що характеризують питоме енергоспоживання, та різних методик ранжування [183-189].

У країнах Західної Європи та США широке застосування бенчмаркінгу зумовило появу різних методик. Країни Євросоюзу ввели стандарт EN 16231 «Energy efficiency benchmarking methodology» [128], який розглядає аспекти процедури бенчмаркінгу, а також містить низку вказівок щодо подальшого впровадження і використання енергетичних орієнтирів. Проте, міжнародний стандарт та гармонізований з ним державний стандарт [129] надає лише загальні вказівки щодо проведення бенчмаркінгу енергоефективності [127].

На практиці застосування бенчмаркінгу пов'язано з низкою проблем. Однією

з них є відсутність єдиної його процедури, яка була б прийнятною для всіх підприємств. Не зважаючи на великий інтерес до методології бенчмаркінгу та значну кількість публікацій у цій сфері багато питань залишаються поза увагою. Зокрема, потребує уточнення принципів застосування методології та розробки механізму бенчмаркінгу відповідно до його методології, обумовлених в [128, 129], в тому числі, й стосовно конкретних об'єктів та галузей; необхідною є розробка способу інтеграції процедури бенчмаркінгу енергоефективності в СЕМ підприємства та використання отриманих результатів бенчмаркінгу.

Згідно методології, обумовлених в [128, 129] бенчмаркінг застосовують до питомого енергоспоживання. Для оцінки рівня енергоефективності виконується ранжування об'єктів за величиною питомого енергоспоживання. Для цього пропонується використовувати низку коефіцієнтів: нормалізований композитний індекс [185]; індекс ефективності енерговикористання [130]; коефіцієнт енергетичної ефективності [187]. Не зважаючи на відмінності у формі запису коефіцієнтів, вони з однаковою достовірністю дають змогу позиціонувати об'єкт дослідження за рівнем енергоефективності серед однотипних об'єктів, обраних для порівняння [24]. Однак такий підхід не дає змоги визначити причини неефективного енергоспоживання.

Не вирішеними залишаються питання формування множини показників енергоефективності для порівняльного аналізу, які б враховували особливості умов роботи об'єктів бенчмаркінгового дослідження. Також слід враховувати, що реалізація таких функцій управління, як аналіз, планування, координування, тощо, вимагає формування додаткової інформації, що стосується технічних і технологічних питань.

1.4.2 Урахування комплексності задачі аналізу та оцінювання рівня енергоефективності водопровідного господарства

Енергоефективність будь-якої технологічної системи як її синтетична характеристика є ознакою, що характеризує здатність об'єкта дослідження ефективно функціонувати за умови забезпечення ефективного енергоспоживання. Предме-

том оцінювання є як об'єкт, так і процес, а оцінка може розглядатися на одно-об'єктному та системному рівнях [108, 190]. Енергоефективність належить до числа характеристик, які безпосередньо не спостерігаються і не вимірюються, тобто є прихованими [67]. Складність та багатогранність поняття енергоефективності не дає змоги виявити один єдиний критерій для її кількісного вираження. Визначення рівня енергоефективності СТС та її об'єктів можливе лише на підставі деякої сукупності спостережуваних або вимірюваних ознак, кожна з яких відображає певні аспекти ефективності енергоспоживання [67].

У загальному випадку згідно теоретико-множинного підходу [191, 192] ВГ як СТС S з точки зору її функціонування доцільно представити у вигляді кортежу: $S = \langle X, Y, R \rangle$. Нехай вхідні характеристики СТС X представлено вектором критеріїв $X = (x_1, \dots, x_n)$, компоненти якого x_i є значеннями i -ої характеристики енергоефективності (параметра або показника), що відображає результативність системи з точки зору споживання енергоресурсів. Вектор вихідних параметрів Y складається з елементів, які відповідають реалізації мети функціонування системи: енергоефективність EE ВГ. Відношення $R \in X \times Y$ характеризує взаємозв'язок між вхідними та вихідними характеристиками системи. Отже задача оцінки рівня енергетичної ефективності СТС полягає в побудові залежності $EE = f(X)$. Проте, в такій постановці задача оцінювання рівня енергетичної ефективності СТС є громіздкою та належить до класу погано формалізованих задач [62].

Аналіз функціонування будь-якої СТС вимагає вивчення умов та особливостей функціонування її технологічних об'єктів, ефективності організації режимів їх роботи та використання ресурсів, необхідних для реалізації технологічного процесу тощо. Отже, СТС слід розглядати як сукупність укрупнених компонентів, необхідних для існування і функціонування досліджуваної системи [192]:

$$S \underset{def}{=} \langle G, STR, TECH, COND \rangle, \quad (1.1)$$

де $G = \{g_i\}$ - сукупність або структура цілей функціонування системи (в контексті даної роботи – глобальною метою є енергоефективність ВГ та його об'єктів);

$STR = \{STR_{вир}, STR_{орг}, \dots\}$ - сукупність структур, що реалізують мету; $STR_{вир}$ -

виробнича, STR_{org} - організаційна, тощо;

$TECH = \{meth, means, alg, \dots\}$ - сукупність технологій (методи $meth$, засоби $means$, алгоритми alg і т.п.), що реалізують систему;

$COND = \{\varphi_{ex}, \varphi_{in}\}$ - умови існування системи, тобто чинники, що впливають на її функціонування (φ_{ex} - зовнішні, φ_{in} - внутрішні).

Енергоефективність СТС визначається сукупністю внутрішньо технологічних та зовнішніх чинників, що певним чином впливають на стан СТС та об'єднують в собі характеристики вихідного вектора. Врахування по можливості максимальної кількості факторів (а також показників, що їх визначають), що впливають на результат, є важливим моментом достовірності отриманих висновків. Вхідними параметрами будь-якої СТС також є сировина, енергетичні та природні ресурси, які за умови використання матеріальної бази виробництва (технологічного устаткування, системи контролю й обліку енергоресурсів тощо) та системи керування забезпечують виробництво продукції [29]. Сировина та матеріальна база виробництва визначають початкові умови технологічного процесу та характеризують вихідний стан технологічної системи. Ефективність використання матеріальної бази СТС відображається у завантаженні технологічного обладнання, що безпосередньо впливає на величину споживання електроенергії та природних ресурсів [62]. Виробництво продукції вимагає здійснення керування режиму роботи технологічного обладнання, організації системи контролю та обліку енергоспоживання. Разом з цим, ефективність енергоспоживання СТС залежить від вирішення таких задач, як планування режиму роботи – задач оптимізації режиму роботи структурних елементів, планування та оптимізації режиму електроспоживання, а також управління ним [21, 22]. Отже, оцінювання рівня енергоефективності необхідно здійснювати з урахуванням внутрішніх та зовнішніх чинників x , що визначають ефективність вихідного стану $E_{стану}$ технологічної системи та організації технологічного процесу $E_{орг.пр.}$; ефективність використання природних ресурсів $E_{викор.прир.рес.}$, технологічного устаткування $E_{викор.уст.}$, енергетичних ресурсів $E_{викор.енергії}$; ефективність планування $E_{пл.}$, оптимізації $E_{опт.}$ та керування $E_{упр.}$ режимом роботи технологічної системи та її об'єктів [62]. Отже, модель оціню-

вання рівня енергоефективності ВГ як СТС, структура якої визначається типом задач аналізу, матиме вигляд [18, 62]:

$$EE = f \left\{ \begin{array}{l} (E_{\text{вик.прир.рес.}}, E_{\text{вик.уст.}}, E_{\text{вик.енергії}}) \\ (E_{\text{стану}}, E_{\text{орг.пр.}}) \\ (E_{\text{опт.}}, E_{\text{пл.}}, E_{\text{упр.}}) \end{array} \right\} \quad (1.2)$$

$$E_i = f(x_1, \dots, x_n),$$

де n – кількість чинників.

Залежно від глибини та напрямків проведення дослідження, які визначаються службою ЕМ підприємства, аналіз енергоефективності виконується по кожній підзадачі або їх групі. Аналіз енергоефективності спираючись на (1.2) дає змогу визначити «слабкі» місця в структурі СТС та організації технологічного процесу з енергетичної точки зору, скласти набір першочергових задач, розв'язок яких забезпечить підвищення рівня енергоефективності.

1.4.3 Урахування ієрархічності проблеми енергоефективності водопровідного господарства

ВГ представляє собою складний комплекс, що складається з великої кількості елементів, які знаходяться на різних ієрархічних рівнях та разом утворюють складну розгалужену систему із чітко впорядкованою ієрархічною структурою [21]; характеризуються певними вихідними умовами; мають свої особливості функціонування та закони управління енергоспоживанням [22]. Забезпечення енергоефективності ВГ як багаторівневої системи (рис. 1.19) базується на такій ідеї: рівень енергоефективності галузі залежить від рівня енергоефективності ВГ регіонів, що залежить від рівня енергоефективності ВГ підпорядкованих міст, який у свою чергу, залежить від рівня енергоефективності підприємств та їх локальних об'єктів. Залежно від завдань та цілей забезпечення енергоефективності управління енергоспоживанням здійснюється на макрорівнях (на галузевому, регіональному, міському рівнях) та на мікрорівнях (на рівні підприємства, технологічного процесу, установки).

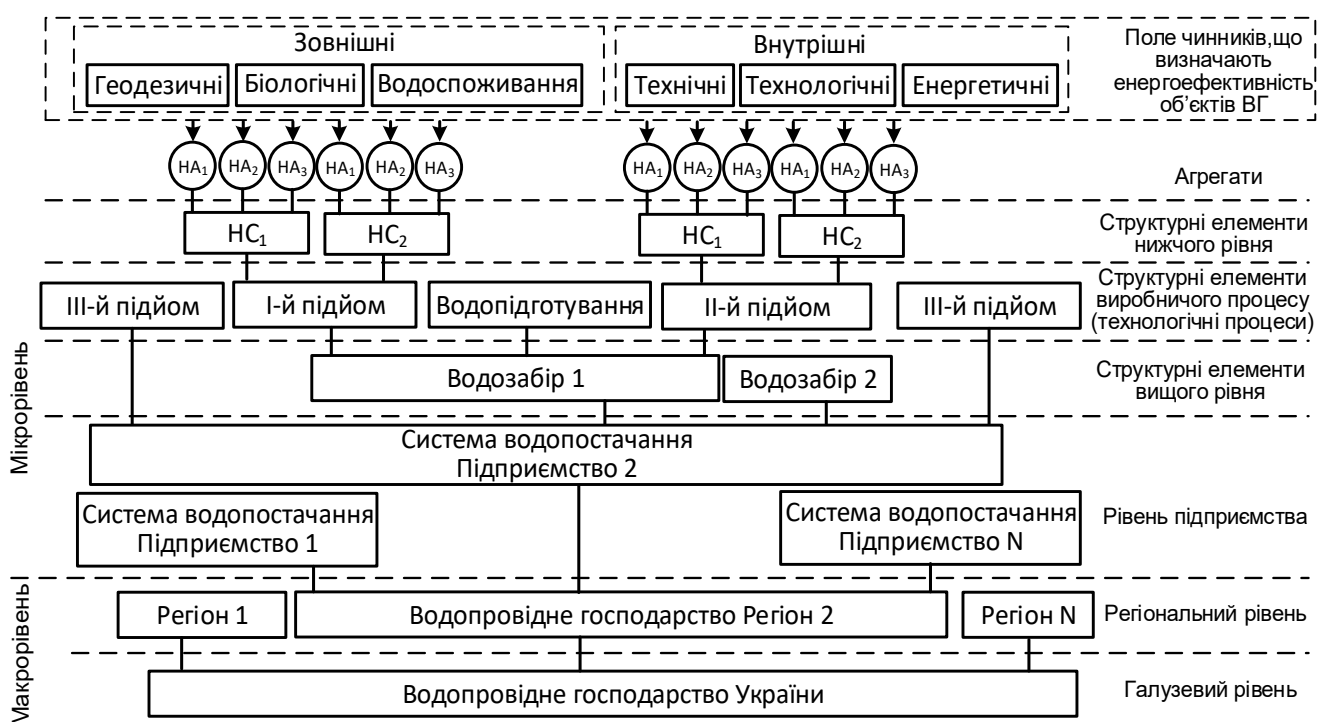


Рисунок 1.19 – Ієрархічна структура забезпечення енергоефективності ВГ

На макрорівні з позиції регулюючих органів, що виробляють різні заходи зі стимулювання розвитку галузі і напрями вдосконалення державної політики, важливим є моніторинг загальної ситуації в галузі, аналіз і типологія об'єктів за рівнем енергоефективності. На мікрорівні метою є виявлення шляхів зниження енергоспоживання для зменшення енергетичної складової в структурі витрат підприємства. Отже, поняття «енергоефективність» є не лише складним, але й ієрархічним, тобто таким, структура якого містить кілька взаємопов'язаних та взаємопідпорядкованих рівнів показників. При цьому необхідно враховувати існуючі взаємозв'язки між характеристиками енергоефективності та між об'єктами ВГ різних ієрархічних рівнів та їх підпорядкованість.

Багаторівнева математична модель енергоефективності ВГ по будь-якій із підзадач (1.2) може бути представлена таким чином:

- енергетична ефективність структурного елементу підприємства ВКГ нижчого ієрархічного рівня:

$$EE = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1.3)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – множина чинників енергоефективності;

- енергетична ефективність підприємства ВКГ, що містить m структурних

елементів:

$$EE_{n\dot{d}np.} = f_2(EE_1, EE_2, \dots, EE_m); \quad (1.4)$$

- енергетична ефективність регіону, який об'єднує кілька підприємств ВКГ:

$$EE_{рег.} = f_3(EE_{n\dot{d}np.1}, EE_{n\dot{d}np.2}, \dots, EE_{n\dot{d}np.N}); \quad (1.5)$$

- енергетична ефективність ВГ (галузі) на рівні держави:

$$EE_{держ.} = f_4(EE_{рег.1}, EE_{рег.2}, \dots, EE_{рег.K}). \quad (1.6)$$

Узагальнену модель енергоефективності ВГ як багаторівневої структури «структурний елемент - підприємство – регіон – галузь» матиме вигляд:

$$EE_{держ.} = F(f_4(f_3(f_2(f_1(x_1, x_2, \dots, x_n))))). \quad (1.7)$$

Однак уже на рівні підприємства, що забезпечує водопостачання населеного пункту обласного значення, одночасне урахування всіх показників та чинників енергоефективності та опис їх взаємозв'язків може істотно ускладнити не тільки процедуру оцінювання рівня енергоефективності та аналізу отриманих результатів, а й їх розуміння. Ще більш складним таке урахування буде на обласному (регіональному) рівні, оскільки отримання такого обсягу інформації, а також її одночасне упорядкування може бути проблематичним [54]. Отже, необхідною є розробка механізму урахування сукупності показників енергоефективності, який би забезпечував спрощений, але достатній ступінь опису об'єкту дослідження та існуючих взаємозв'язків залежно від його ієрархічного рівня та задачі дослідження.

1.4.4 Урахування особливостей умов роботи об'єктів водопостачання та сучасних принципів підвищення їх рівня енергоефективності

Оскільки підсистема НС водопостачання є найбільш значимим споживачем електроенергії в СКВ, то забезпечення ефективного електроспоживання НС є істотним кроком у вирішенні проблеми енергоефективності СКВ та всього ВГ. Енергоефективність режиму роботи НС залежить від експлуатаційних характеристик обладнання, виду їх заводських напірно-витратних і енергетичних характе-

ристик, числа і схеми включення одночасно працюючих НА, способу управління електромеханічними і технологічними параметрами [15, 16, 98, 193]. Сумарні витрати електроенергії на перекачування залежать від обсягу води, що перекачується, і напору, що створюється при її перекачуванні.

Для НС II-го підйому вагомим чинником є графік водоспоживання, що змінюється в часі. Як відомо, напірна характеристика опору водопровідної мережі залежить від гідравлічних параметрів мережі (довжина та діаметри трубопроводів, геодезичні відмітки НС та споживачів), які майже не змінюються в часі, та господарської діяльності споживача, яка має випадковий характер, зумовлений хаотичністю включення або відключення окремих споживачів [194]. Водоспоживання є одним з зовнішніх чинників, що визначає витрату води з мережі, а отже ефективність режиму водоподачі та разом з іншими технічними та технологічними чинниками - ефективність електроспоживання [19, 44, 46]. Режим подачі води в мережу водопостачання визначається поточним водорозбором (витратою води з мережі водопостачання). Водоспоживання, а отже й водорозбір мають яскраво виражені коливання впродовж доби, місяця, року, тобто, є нерівномірними [15, 47, 195]. Нерівномірність споживання води протягом року зумовлена зміною укладу життя населення у вихідні, святкові та робочі дні; відключенням опалення, гарячого водопостачання; впливом сезонних чинників (температура повітря, кількість опадів) тощо [195, 196]. Забезпечення ефективного електроспоживання в СКВ вимагає оптимізації режиму електроспоживання НС [21, 22], а також оптимізації технологічного процесу водоподачі. При цьому, основним критерієм, що визначає ефективність роботи СКВ та її структурних елементів є забезпечення споживача водою в кількості, рівній його потребі. Отже, наявним є безпосередній зв'язок завдання планування витрат електроенергії із завданням планування водоподачі відповідно до водоспоживання [19, 46, 47].

Таким чином, будь-який об'єкт ВГ слід розглядати як СТС, яку можна описати наборами вхідних та вихідних характеристик (природних, технічних, технологічних, гідравлічних та енергетичних параметрів, показників енергоефективності, кліматичних та соціальних чинників тощо) (рис. 1.20), які визначають його

поточний стан, в тому числі, з точки зору ефективності енергоспоживання:

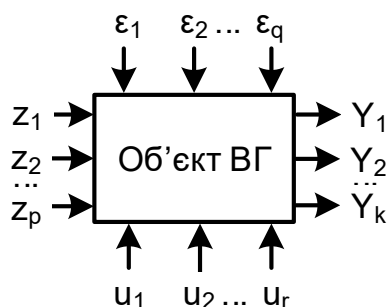


Рисунок 1.20 – Модель стану СТС

- контрольовані некеровані чинники, описані набором характеристик $z = \{z_1, z_2, \dots, z_p\}$, значення яких можна виміряти, але не можна довільно змінити;

- контрольовані керуючі чинники, описані набором характеристик $u = \{u_1, u_2, \dots, u_r\}$, значення яких в довільний момент часу можна змінити в межах допустимого діапазону;

- неконтрольовані некеровані чинники, описані набором характеристик $\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_q\}$, які характеризують множину реально існуючих чинників, що мають вплив на поточний стан об'єкту, але не піддаються керуванню; потребують врахування для досягнення енергоефективності об'єкту дослідження, але їх значення випадковим чином змінюються з плином часу, створюючи дисперсію неврахованих факторів або стохастичний шум ζ ;

- контрольовані керовані змінні $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_k\}$, які характеризують результат функціонування об'єкту, в тому числі, з точки зору енергоефективності.

Вхідні змінні z , u , ε слід розглядати як причини, що мають вплив на кожну з вихідних змінних Y , що характеризує енергоефективність об'єкту ВГ. Параметри СТС зв'язані деякими функціональними відносинами, які в синтезованій моделі відображаються набором рівнянь Ψ різної математичної природи. Зважаючи, що ВГ як СТС представляє собою динамічний об'єкт, модель повинна враховувати множину моментів часу T [191], для яких виміряні миттєві значення змінних. Крім того, ВГ є системою з розподіленими параметрами, компоненти якої можуть змінюватися не лише в часі, а й в просторів S . Отже, синтезована модель ВГ як СТС набуває вигляду [191]:

$$Y = \Psi(z, u, t, s, \varepsilon) + \zeta \quad (1.8)$$

Для спрощення змінні z та u доцільно об'єднати в одну групу змінних X та вважати, що змінні x_i ($i=1, \dots, m$) є не випадковими контрольованими змінними.

Сучасне вирішення проблеми підвищення енергоефективності ВГ згідно

[197] передбачає розробку енергозберігаючих систем та алгоритмів управління, засобів підвищення енергетичної та технологічної керованості об'єктів водопостачання, систем ідентифікації аварійних режимів роботи тощо. Як зазначено в [197], новітні методи та технології управління енергоефективністю об'єктів водопостачання передбачають не лише впровадження альтернативних методів регулювання технологічних параметрів НС, розробку систем оптимального управління НА, автоматизацію процесів оперативного управління режимами водопостачання, а й використання сучасних математичних методів моделювання для прогнозування водоспоживання, планування обсягів подачі води та електроспоживання. При цьому, необхідним є створення надійної та інтелектуальної системи управління об'єктами водопостачання, системи збору і оперативного відображення технологічних параметрів цих об'єктів в пункті диспетчерського управління [198], а також створення великих баз ретроспективних даних [199] та обробка накопиченої інформації для ефективного планування режимів водоподачі та електроспоживання, їх контролю та управління.

1.5 Підхід до вирішення завдань ефективного управління електроспоживанням та підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства

1.5.1 Побудова інтегрованої системи комплексного моніторингу енергоефективності

Підвищення енергоефективності ВГ потребує поліпшення структури СКВ, підвищення результативності та ефективності процесу водопостачання, ефективності електроспоживання тощо [150]. Зв'язати воедино знання про різноманітні складові процесу електроспоживання і способів підвищення рівня енергоефективності ВГ та його об'єктів в єдине ціле можливо за умови використання комплексу підходів і методів направлених на цілісне вивчення предмету дослідження. Це вимагає реалізації заходів для неперервного відслідковування та оцінювання стану об'єкту, реєстрування його характеристик, виявлення впливу різних процесів та чинників на величину електроспоживання, співставлення результатів управлін-

ських впливів (або їх відсутності) з заданими вимогами, прогнозування змін стану об'єкту з метою прийняття управлінських рішень для попередження небажаних тенденцій розвитку, тобто, створення комплексної інтегрованої системи моніторингу енергоефективності [25], яка сприятиме оперативному координуванню режимів роботи об'єктів для забезпечення ефективного електроспоживання. Вона повинна містити комплекс заходів, спрямованих на реалізацію основних функцій: спостереження, оцінювання стану об'єкту, планування та контролю, конкретизованих специфікою об'єкту дослідження та поставленими задачами.

Моніторинг енергоефективності будь-якої СТС повинен створити передумови для удосконалення та підвищення ефективності функціонування системи та її складових, стати основою для розробки та реалізації методів керування та планування ефективного режиму роботи [38]. Тобто, система моніторингу енергоефективності будь-якої СТС (в тому числі, й ВГ) повинна будуватись не лише як технічна система обліку та контролю енергоспоживання, але й як система, яка на основі інформації про обсяг спожитої енергії, функціонування об'єктів технологічної системи та стан зовнішнього середовища забезпечуватиме управлінський аспект процесу підвищення енергоефективності [25, 70].

Сучасні вимоги до створення систем збору, аналізу та використання даних про кінцеве енергоспоживання вимагають поєднання процедур порівняльного аналізу та процесу моніторингу ефективності енергоспоживання. Інтегрована система моніторингу енергоефективності повинна забезпечувати не лише реалізацію основних функцій моніторингу, а й можливість співставлення отриманих результатів з кращими практиками в сфері ефективного енергоспоживання, а також враховувати специфіку об'єкту дослідження та сприяти прийняттю дієвих управлінських рішень щодо підвищення енергоефективності. Однією з складових вирішення даного завдання повинен стати бенчмаркінг енергоефективності (рис. 1.21), який слід розглядати як невід'ємну частину планування, аналізу та оцінки ефективності процесу енергоспоживання [61, 82, 127], а також як інструмент ефективного управління для безперервного поліпшення СТС в цілому та її об'єктів.

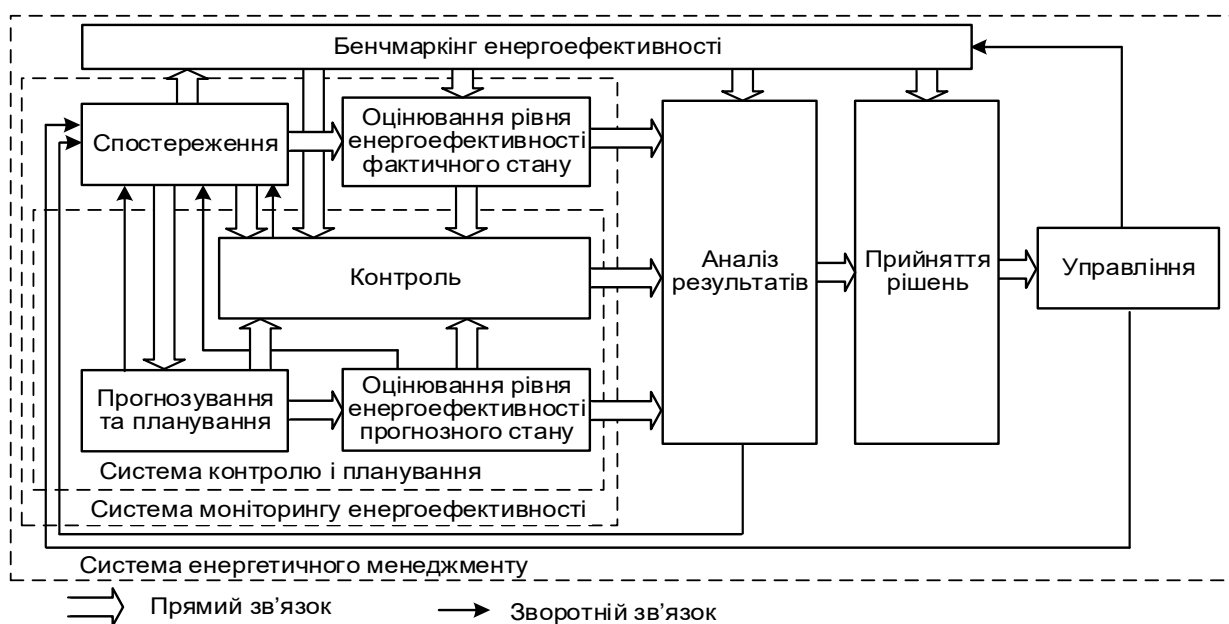


Рисунок 1.21 - Зв'язок бенчмаркінгу та функцій моніторингу в структурі СЕМ

Прив'язка моніторингу до місць енергоспоживання закладає фундамент системи контролю енергоефективності, як підсистеми ЕМ [43, 61], який передбачає [124]: контроль технологічних процесів; виявлення ключових показників енергоефективності; застосування методів, що дозволяють вимірювати і контролювати ці параметри; документування та аналіз позаштатних ситуацій та умов роботи з метою виявлення і усунення їх причин для запобігання повторення подібних ситуацій у майбутньому. Контроль - складова процесу управління енергоефективністю, що вимагає постійного аналізу енергоспоживання, динаміки показників енергоефективності та виявлення тенденцій до погіршення (поліпшення) [43]. При цьому, під контролем мається на увазі реалізація процедур спостереження, збору та реєстрації інформації; виявлення, аналізу, оцінки та інформування про відхилення фактичних значень контрольованих параметрів від прийнятих нормативів.

Реалізація кожної з функцій моніторингу енергоефективності ВГ – це є окрема задача, яка потребує вирішення низки завдань (рис. 1.22) з урахуванням особливостей функціонування структурних елементів ВГ різних ієрархічних рівнів, зокрема, формування сукупності показників енергоефективності для кожного конкретного випадку, побудови математичних моделей електроспоживання та розробки алгоритмів контролю його ефективності залежно від ієрархічного рівня вибраного об'єкту дослідження [38].

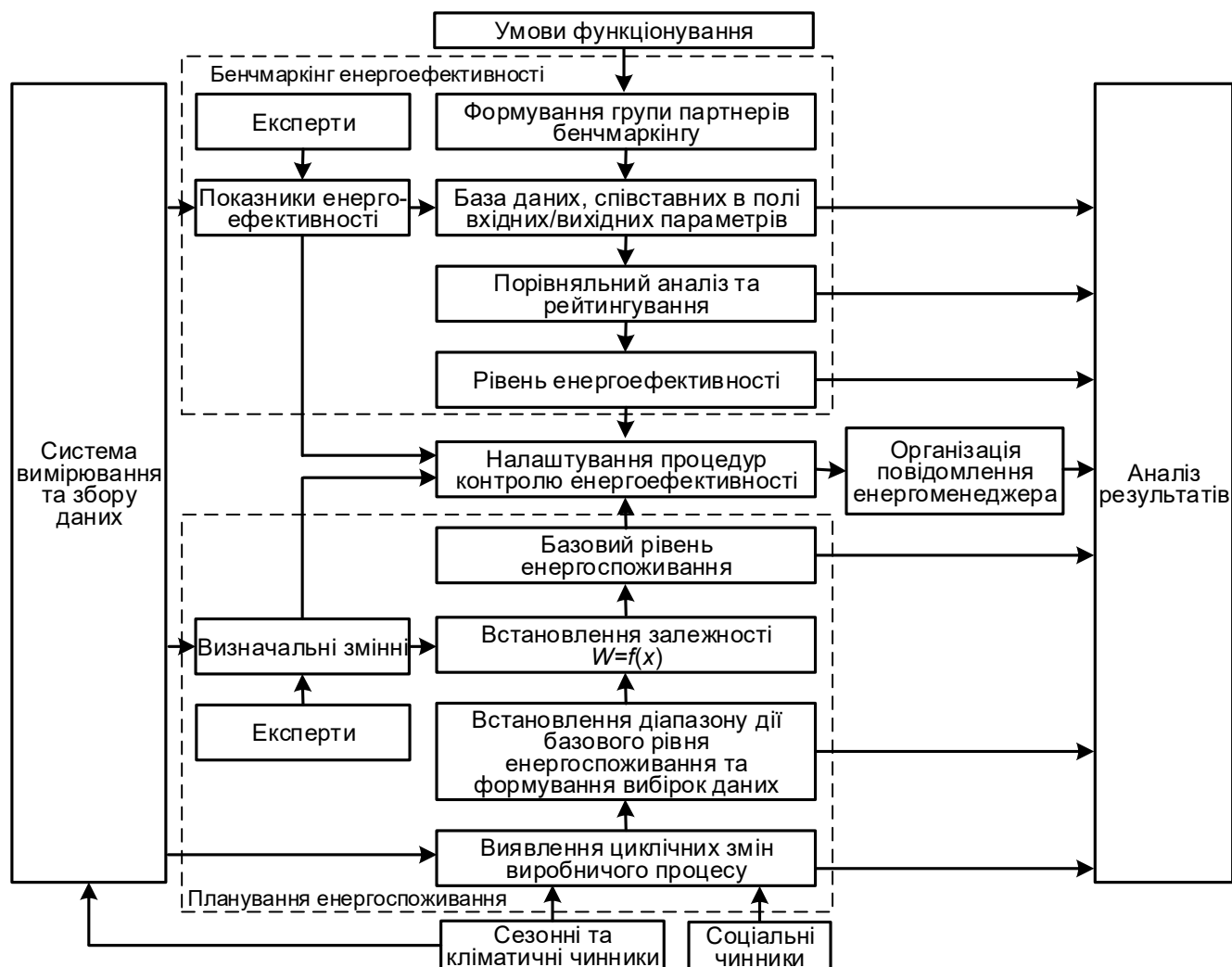


Рисунок 1.22 – Задачі моніторингу енергоефективності

Основним принципом функціонування системи моніторингу енергоефективності повинна бути безперервність пооб'єктного контролю та урахування отриманої інформації для удосконалення процесу водопостачання, планування енергоефективних режимів роботи та електроспоживання. Для забезпечення реалізації зазначених завдань моніторингу енергоефективності ВГ необхідним є розроблення відповідних підходів та методів, які б дозволяли враховувати умови вихідного стану та функціонування СКВ та її об'єктів, а також технічні, технологічні та інші чинники, що мають вплив на ефективність електроспоживання; забезпечували можливість виявлення джерел нераціональних витрат електроенергії та негативних тенденцій, сприяли прийняттю дієвих рішень щодо підвищення енергоефективності всієї СКВ та її елементів [38].

1.5.2 Застосування стратифікованого підходу до проблеми енергоефективності та концепції пірамідального підходу

Під час реалізації ефективного управління енергоспоживанням та підвищення рівня енергоефективності ВГ складно побудувати ієрархічну структуру у вигляді єдиного «дерева», що зв'язує завдання бенчмаркінгу та моніторингу енергоефективності всієї галузі, підприємств та їх структурних елементів з точки зору охоплення всіх аспектів проблеми. Тому, доцільно скористатися методикою структуризації цілей [192].

Факт, що вирішення проблеми енергоефективності направлено на стабілізацію функціонування та удосконалення системи з ієрархічною структурою, зумовлює ієрархічність і самої проблеми. Кожна проблема являє собою сукупність підпроблем, і в той же час може розглядатися як частина більш складної проблеми. Проблему енергоефективності ВГ слід розглядати як таку, що складається з підпроблем різних рангів [54, 72]: енергоефективності окремих підприємств, що утворюють ВГ міста, регіону; енергоефективності виробництв, технологічних процесів, структурних елементів; ефективності управління та організації технологічного процесу як в цілому по підприємству, так і для окремих елементів.

Структуризація цілей пов'язана з рішенням низки завдань щодо визначення:

- взаємозв'язку множини підцілей і сукупності критеріїв, що визначають енергоефективність об'єкту дослідження як глобальну мету G , а саме:

а) визначення множини підцілей $G = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$ для забезпечення енергоефективності як глобальної мети і класифікація її елементів;

б) задання множини критеріїв $K = \{k_1, k_2, \dots, k_j\}$ на сукупності елементів з множини $G = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$;

- відносин множини елементів і підсистем ВГ та сукупністю завдань, що вирішуються для досягнення глобальної мети та її підцілей:

а) визначення множини елементів і підсистем ВГ $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ і множини завдань $F = \{f_1, f_2, \dots, f_r\}$, які потребують вирішення для досягнення мети на множині $G = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$;

б) визначення для кожного об'єкту з множини елементів і підсистем ВГ $S =$

$\{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ множини параметрів та характеристик $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$, які забезпечують формалізований опис стану об'єкту та його умов функціонування для вирішення завдань $F = \{f_1, f_2, \dots, f_r\}$ на множині $G = \{g_1, g_2, \dots, g_k\}$. Причому, для кожного показника x_i необхідно встановити множину допустимих значень $\{x_i^{don}\}$.

Вирішення складових задач проблеми енергоефективності об'єкту дослідження в просторі його станів пов'язано з вибором множини критеріїв оцінки стану об'єкта управління і ефективності його функціонування $K = \{k_1, k_2, \dots, k_j\}$ та множини параметрів та характеристик $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ для відображення елементів множини завдань $F = \{f_1, f_2, \dots, f_r\}$ в множину критеріїв $K = \{k_1, k_2, \dots, k_j\}$ та характеристик $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. Це завдання вимагає застосування інтуїції і досвіду фахівців, тобто, знань експертів.

Основна проблема при відображенні СТС полягає в знаходженні компромісу між простотою опису, що дозволяє отримати цілісне уявлення про об'єкт, і деталізацією опису, що дозволяє відобразити численні особливості об'єкта. Один із шляхів вирішення цієї проблеми - задання системи сімейством характеристик, що описують її поведінку з позиції відповідного рівня абстрагування. Для кожного рівня існують характерні особливості та закони, за допомогою яких описується поведінка системи. Таке уявлення є стратифікованим, а рівні абстрагування - стратами [192], які виділяють за принципом використання різних «мов» представлення цілей. Стратифіковане уявлення дозволяє організувати взаємодію між структурами цілей різних рівнів. Перевагою стратифікованого підходу є те, що починати вивчення систем можна з будь-якої страти [192]. На кожній страті може використовуватися свій опис, своя модель, але система зберігається до тих пір, поки не змінюється уявлення на верхній страті [192]. Страта характеризує рівень абстрагування (опису) властивостей реального об'єкта. Стратифіковане уявлення використовують для послідовного поглиблення уявлення про систему, її деталізації [192]: чим нижче рівень ієрархії, тим більш детальним є опис системи. Іншими словами, для кожного рівня проблеми енергоефективності існують свої цілі і завдання, своя структура підпроблем, а значить і деяка множина показників енергоефективності, яка забезпечує достатній ступінь деталізації для даного рівня [54].

Ідея стратифікованого підходу відповідає запропонованій МЕА концепції «пірамідального підходу» до аналізу енергоефективності – від найбільш агрегованого рівня до деагрегованого [200]. Укрупнені показники верхніх рівнів повинні дати загальне уявлення про причини тенденцій енергоспоживання в галузі. Нижній рівень – це види кінцевого споживання, які послідовно надають все більш докладну інформацію, що характеризує енергетичні, фізичні процеси або технічні пристрої кінцевого споживання енергії [201].

Отже, для аналізу енергоефективності ВГ як СТС необхідно використовувати багаторівневу систему показників, яка б забезпечувала можливість аналізу ефективності електроспоживання на різних ієрархічних рівнях [41, 54]; кількісної оцінки параметрів стану та вихідних умов функціонування; розкриття закономірностей споживання електроенергії; контролю електроспоживання, дотримання оптимальних параметрів технологічного процесу. Перевагу слід надавати системі показників енергоефективності, яка відображатиме [30] технічний стан, рівень електроспоживання та ефективність організації технологічного процесу в СКВ, ієрархічного рівня та кожного структурного елемента. Система показників енергетичної ефективності повинна задовольняти такі вимоги [102, 174]: відображати основні характеристики режиму електроспоживання об'єктів водопостачання; характеризуватися функцією монотонності (покращення будь-якого показника при фіксованих значеннях інших показників повинно зумовлювати підвищення рівня енергоефективності), критичності до варійованих параметрів (реагувати на зміну показників режиму електроспоживання), чутливості (величина показника повинна відрізнятися на достатню величину), нормованості (чисельне значення показника має бути між максимальним і мінімальним значеннями відносних показників) та порівнюваності результатів (результати комплексної оцінки не повинні залежати від вибору нормуючих показників); формуватися на основі підходу «знизу вгору» по рівнях ієрархії ВГ; забезпечувати відсутність «подвійного урахування» показників, можливість реального визначення показників енергоефективності та їх доцільність з точки зору практичного застосування в системі управління енергоспоживанням, однозначність в інтерпретації (зміна значень показників повинна одно-

значно свідчити про позитивні або негативні зміни у досягненні мети), доступність даних, необхідних для розрахунку значень показників, та можливість регулярного оновлення. Слід зазначити, що показники енергоефективності повинні бути доступними для спостереження (тобто повинна існувати можливість простежити процес їх формування на основі вихідних даних) і підтримуватися в актуальному стані.

1.6 Висновки до розділу та постановка задачі дослідження

1. Аналіз поточного стану енергоефективності водопровідного господарства та чинників, що впливають на ефективність електроспоживання об'єктів водопостачання, показав, що для СКВ характерним є низький рівень ефективності електроспоживання, який обумовлений як вихідними умовами функціонування та критичним технічним станом технологічного обладнання, так і недосконалістю організації технологічного процесу водоподачі.

2. Огляд сучасних тенденцій у сфері підвищення рівня енергоефективності дозволяє стверджувати, що вирішення даної проблеми потребує ефективного управління енергоспоживанням з урахуванням явних і прихованих причинно-наслідкових зв'язків, при цьому однією з вимог є необхідність постійного удосконалення складної технологічної системи та її об'єктів, в тому числі, спираючись на досвід кращих практик енергозбереження.

3. Аналіз сучасних вимог у сфері енергоефективності свідчить, що для підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства необхідним є використання сучасних інструментів управління енергоспоживанням. Це потребує розвитку теорії моніторингу енергоефективності складних технологічних систем, розроблення та удосконалення його процедур та концепції інтеграції їх результатів в СЕМ підприємства ВКГ, яке повинне забезпечити в комплексі спостереження, аналіз, оцінку, планування та контроль ефективності електроспоживання і результатів впровадження заходів щодо підвищення рівня енергоефективності, формування порівняльної бази щодо ефективності електроспоживання

4. Огляд інструментів ефективного управління енергоспоживання вказує, що вирішення проблеми енергоефективності водопровідного господарства повинне спиратися на комплексний аналіз особливостей функціонування об'єктів водопостачання; передбачати можливість оцінки рівня енергоефективності, виявлення резервів економії енергоресурсів і шляхів їх реалізації. Це потребує розробки відповідних підходів та методів, які б дозволили врахувати умови вихідного стану та функціонування системи водопостачання та її об'єктів; технічні, технологічні та інші чинники, що мають вплив на ефективність електроспоживання; забезпечували можливість виявлення причин неефективної витрати електроенергії та негативних тенденцій в електроспоживанні.

5. Заважаючи на те, що водопровідне господарство є складною технологічною системою з ієрархічною структурою, вирішення задач ефективного управління потребує урахування ієрархічного рівня об'єкту дослідження. При цьому, потребують вивчення та систематизації питання формування сукупності показників енергоефективності, визначальних змінних, які впливають на рівень енергоефективності, їх урахування під час побудови моделей електроспоживання та визначення БРЕ, організації контролю ефективності електроспоживання для кожного конкретного об'єкту дослідження.

6. Аналіз чинників, що визначають ефективність електроспоживання в СКВ, свідчить, що поряд з низкою технічних і технологічних чинників необхідним є урахування водоспоживання, яке має випадковий характер, формується під впливом сезонних і соціальних чинників зовнішнього середовища та визначає ефективність режиму водоподачі. Це потребує організації моніторингу водоспоживання та формалізації впливу сезонних, кліматичних та соціальних чинників для виявлення коливань процесу водоподачі, удосконалення організації планування та контролю електроспоживання з урахуванням зміни фактичних умов роботи об'єктів водопостачання.

7. Аналіз існуючих підходів щодо підвищення енергоефективності та завдань для ефективного вирішення даної проблеми для об'єктів водопровідного господарства дозволив сформулювати **задачі дослідження:**

1. Запропонувати методологію комплексного моніторингу ефективності електроспоживання складних технологічних систем як складової енергетичного менеджменту, яка б забезпечувала виявлення тенденцій у електроспоживанні, причин, що їх зумовили, а також шляхів підвищення рівня енергоефективності об'єктів водопровідного господарства.

2. Розробити механізм бенчмаркінгу енергоефективності складних технологічних систем, який би забезпечував оцінку рівня енергоефективності об'єктів водопровідного господарства, визначення завдань для його підвищення та шляхів їх реалізації.

3. Розробити методологію планування електроспоживання об'єктів водопостачання, яка б дозволяла врахувати їх ієрархічний рівень, циклічні зміни процесу водоподачі та забезпечувала визначення базового рівня електроспоживання адаптованого до умов роботи об'єкту.

4. Запропонувати механізм моніторингу коливань процесу водоподачі об'єктів водопостачання, зумовлених впливом сезонних, кліматичних і соціальних чинників.

5. Запропонувати спосіб формалізованого опису типових умов роботи об'єктів водопостачання та ідентифікації їх зміни, а також корегування результатів опису з урахуванням впливу аномальних кліматичних чинників.

6. Розробити механізм контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання, який би дозволяв врахувати зміну фактичних умов їх роботи, зумовлену впливом сезонних, кліматичних і соціальних чинників, забезпечував можливість виявлення тенденцій до підвищення (погіршення) рівня енергоефективності, а також урахування кращих практик ефективного електроспоживання.

7. Запропонувати концепцію інтегрування результатів процедур комплексного моніторингу енергоефективності в інформаційну систему енергоменеджменту підприємства та побудови інформаційного простору комплексного моніторингу енергоефективності водопровідного господарства.

РОЗДІЛ 2

ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА ЙОГО ОБ'ЄКТІВ НА ЗАСАДАХ БЕНЧМАРКІНГУ

2.1 Методологічні аспекти бенчмаркінгу енергоефективності складних технологічних систем

2.1.1 Завдання та сфери застосування бенчмаркінгу енергоефективності з урахуванням об'єкту наслідування

Предметом бенчмаркінгу енергоефективності є процес енергоспоживання у агрегатах, технологічних установках, технологічних процесах тощо, а також методи побудови їх режимів роботи та організації виробництва в цілому [127]. Зважаючи на багатогранність проблеми енергоефективності СТС, важливим моментом проведення бенчмаркінгу є визначення глибини та напрямку дослідження [62], ієрархічного рівня об'єкту дослідження та переліку підзадач. Для кожного об'єкту формується мета, сфери та підсфери дослідження, показники енергоефективності для кожної сфери. Їх сукупність утворює систему бенчмаркінгу [70], яка має чітко визначені завдання (рис. 2.1) та передбачає побудову зв'язків між складовими проблеми енергоефективності залежно від її постановки та ієрархічного рівня, на якому проводиться дослідження, показниками енергоефективності [27].

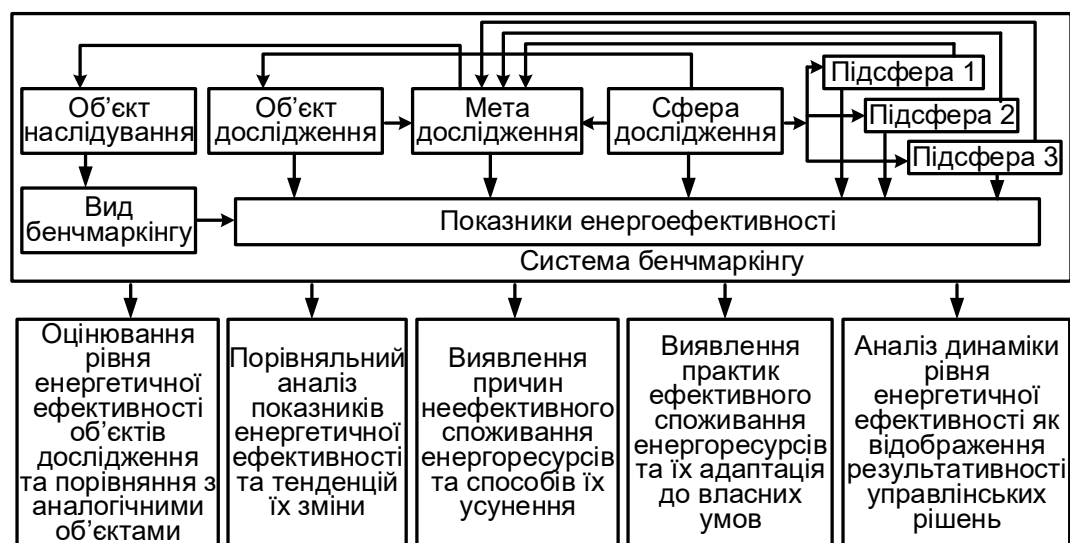


Рисунок 2.1 – Система бенчмаркінгу та її завдання

Бенчмаркінг в управлінні енергоефективністю зводиться до двох завдань [63, 64]: 1) ідентифікація кращих досягнень у сфері енергоефективності за кожний період часу; 2) орієнтація об'єкту дослідження на досягнення цих результатів.

З позиції вибору об'єктів для порівняння слід розглядати внутрішній (порівнюються об'єкти одного ієрархічного рівня всередині СТС) та зовнішній (порівнюються аналогічні об'єкти інших СТС або аналогічних технологічних систем в цілому) бенчмаркінг. Внутрішній бенчмаркінг енергоефективності спрямований на пошук об'єктів всередині СТС, які мають вищий рівень енергоефективності, і є корисним для безперервного вдосконалення енергоефективності агрегатів, технологічних установок, технологічних процесів, перевірки дотримання енергетичних цілей, розуміння результативності заходів з підвищення енергоефективності. Проте, більш ефективним є порівняння з іншими аналогічними об'єктами. Зовнішній бенчмаркінг енергоефективності спрямований на визначення, адаптацію та впровадження таких методів організації технологічного процесу, режиму роботи обладнання тощо, які є кращими в галузі, та застосування результатів порівняння як засобу безперервного вдосконалення об'єкту дослідження.

Зважаючи на обраний об'єкт наслідування, можливим є [63, 64]: бенчмаркінг «лідера» - об'єктом наслідування є вищий рівень, якого ніхто не досягнув, передбачається вдосконалення методів і процесів, необхідним є встановлення особливого об'єкта наслідування, який може складатися з кількох об'єктів (як реально існуючих, так і ідеальних); бенчмаркінг «середнього рівня» – об'єктом наслідування є процеси енергоспоживання об'єктів, які досягли такого ж або вищого рівня енергоефективності; бенчмаркінг «спокою» – об'єктом наслідування є досягнення об'єктів, які не займають провідних позицій (низький рівень), передбачається позиціонування об'єкту дослідження серед інших, порівняння загальної ситуації для визначення свого становища і, якщо воно не гірше, ніж в інших, то заспокоєння. Для порівняння застосовуються орієнтири, засновані на результатах минулої енергоефективності; еталонних значеннях; порівнянні декількох об'єктів [127]. Бенчмаркінг енергоефективності об'єкта проти його минулої енергетичної ефективності передбачає визначення відносного поліпшення енергоефективності

протягом певного часу. При цьому, нівелюються проблеми, які виникають у випадку порівняння кількох схожих, але не ідеально відповідних об'єктів. Проте, виникає ризик появи структурних зрушень (наприклад, в результаті введення нових технологій) і результати аналізу можуть відображати як зміни в енергетичній ефективності, так і ефекти цих зрушень [63, 64, 127]. Цей вид бенчмаркінгу споріднений *процедурі поточного контролю рівня енергоефективності* та придатний для внутрішнього бенчмаркінгу, коли відсутні кращі за об'єкт дослідження зразки, або ж для виявлення позитивних зрушень щодо ефективності енергоспоживання (їх відсутності) у випадку об'єктів із стабільно низьким рівнем енергоефективності в групі однотипних. У випадку аналізу енергоефективності об'єкта на основі порівняння значень його показників енергоефективності з еталонними значеннями обов'язковою умовою є можливість достовірного визначення еталонних значень. Порівняння енергоефективності кількох подібних об'єктів передбачає ранжування об'єктів або їх групування за рівнем енергоефективності для ідентифікації відмінностей між кращим і гіршим об'єктами. Цей тип бенчмаркінгу вимагає одночасного аналізу показників енергоефективності кількох подібних об'єктів та їх моніторингу. При цьому, результати бенчмаркінгу будуть відображати відмінності в ефективності енергоспоживання об'єктів, а також відмінності між самими об'єктами.

2.1.2 Механізм та управлінська функція бенчмаркінгу енергоефективності

Бенчмаркінг енергоефективності становить собою процес. Цілі, функції, завдання, принципи та методи, які сприяють ефективному проведенню бенчмаркінгу, складають механізм бенчмаркінгу [27, 64]. Модель методології бенчмаркінгу енергоефективності згідно [128, 129] містить чотири основних етапи (мета і планування; збір і перевірка даних; аналіз даних і результати; звітність) та п'ятий етап (заходи та спостереження), що стосується моніторингу та прийняття коригувальних дій та декларується як обов'язковий. Реалізація кожного з етапів моделі вимагає здійснення низки дій та операцій, застосування відповідних методів та інструментів, виконання розрахункових процедур тощо (рис. 2.2).

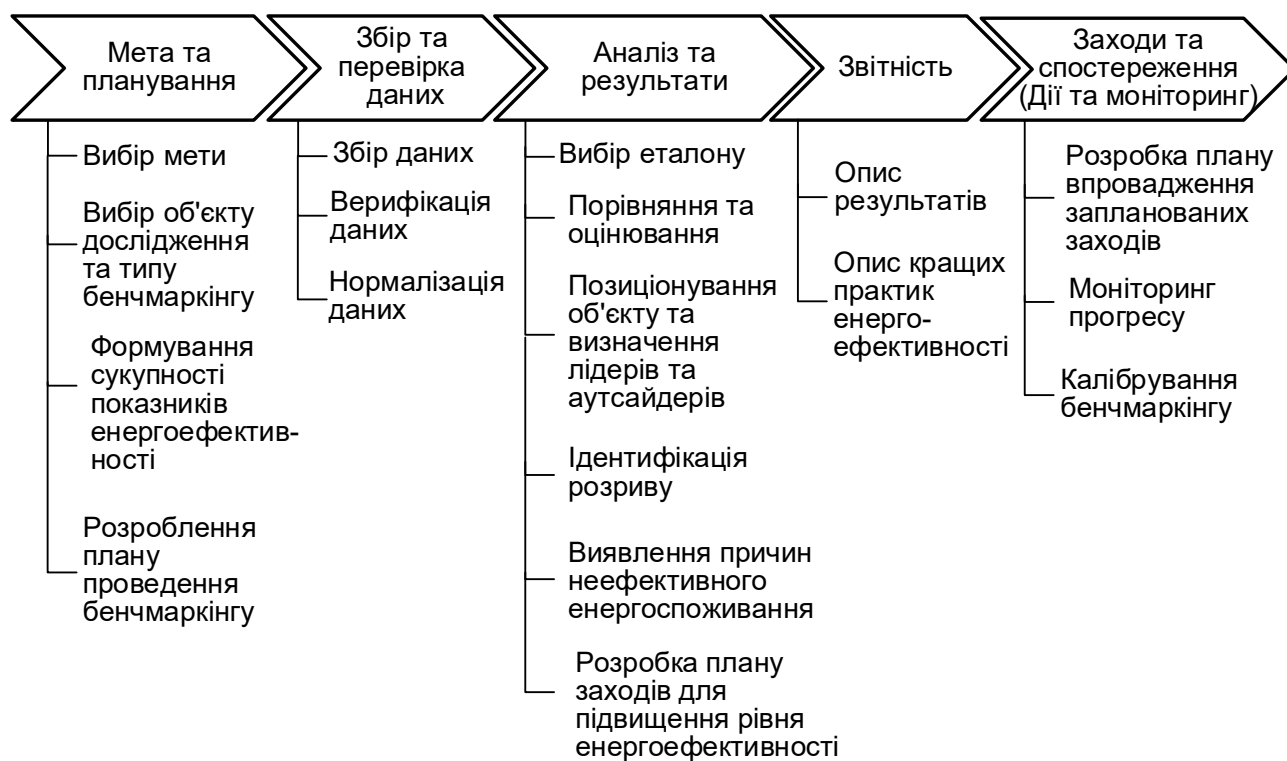


Рисунок 2.2 – Механізм бенчмаркінгу

Слід відзначити призначення окремих складових даного механізму в СЕМ, їх взаємозв'язок та особливості реалізації [27, 64]. Мета бенчмаркінгу впливає на вибір об'єктів для порівняння, показників енергоефективності, налаштування процедур збору та аналізу даних [63, 64, 127]. Збір інформації про фактори переваги повинен забезпечити достатній для досягнення цілей аналізу її обсяг. При цьому, виникає необхідність одержання інформації, репрезентативної щодо різних об'єктів, що знаходяться на різних ієрархічних рівнях СТС. Аналіз означає усвідомлення подібності і відмінності між об'єктами дослідження, розуміння взаємозв'язку між чинниками, що визначають рівень енергоефективності, та має на меті виявлення можливостей застосування передового досвіду й розроблення рекомендацій з удосконалення об'єкта дослідження на підставі отриманих результатів. Аналіз сукупності показників енергоефективності партнерів бенчмаркінгу дозволяє визначити їх найкращі значення та сформулювати еталон ефективного енергоспоживання для подальшого порівняння. Слід зазначити, що еталоном не завжди може бути реальний об'єкт, це може бути ідеал, якого необхідно прагнути, що не існує насправді [62]. Бенчмаркінг в однаковій мірі передбачає порівняння та оцінювання. Результати порівняння даних мають бути оцінені та інтерпретовані. Оціню-

вання передбачає визначення рейтингу об'єкту дослідження з урахуванням сукупності показників енергоефективності, його позиціонування серед інших, визначення лідерів та аутсайдерів. Величина відхилення значень показників від еталонних дозволить ідентифікувати розрив, визначити ступінь відставання об'єкту та що саме необхідно виправити. Для виявлення причин різниці в енергоефективності та шляхів підвищення її рівня необхідним є розуміння заходів, завдяки яким кращі об'єкти досягли успіху. Аналіз вихідного стану, умов функціонування лідерів, особливостей організації їх режимів роботи та процесу енергоспоживання дозволить визначити кращі практики енергоефективності [67]. Завершальним етапом процедури бенчмаркінгу є розробка концепції підвищення енергоефективності об'єкта і програми заходів для її реалізації. Моніторинг та дії передбачає організацію процедур спостереження, аналізу, оцінювання та контролю впливу результатів адаптації кращих практик ефективного енергоспоживання та їх впровадження на рівень енергоефективності об'єкта (моніторинг прогресу), виявлення нових проблем для їх майбутнього вирішення і планування подальших бенчмаркінгових досліджень (калібрування бенчмаркінгу). Після досягнення мети виявляються нові проблеми для їх вирішення, і процедура бенчмаркінгу повторюється, таким чином, процес бенчмаркінгу замикається, забезпечуючи тим самим постійність та безперервність процесу вдосконалення [63, 64].

Головним завданням удосконалення є вибір методологій та інструментів, які містять складову постійного удосконалення. Бенчмаркінг передбачає не лише разову ідентифікацію і впровадження кращої практики, а й постійний пошук проблем і напрямків удосконалення з метою підвищення рівня енергоефективності.

Бенчмаркінг енергоефективності повинен проводитися на регулярній основі, забезпечуючи постійність та безперервність процесу вдосконалення технологічної системи. Інформація, зібрана в процесі бенчмаркінгу, повинна стати основою для подальшого підвищення рівня енергоефективності, використовуватися для планування ефективного енергоспоживання на підприємстві, а також контролю енергоспоживання та результативності прийнятих рішень [26]. Систематичне визначення різниці в енергоспоживанні та розривів з кращою практикою, визначен-

ня та реалізація заходів щодо підвищення рівня енергоефективності, моніторинг результатів впровадження і переоцінка результатів бенчмаркінгу є частиною циклу постійного удосконалення технологічної системи, що приводить до покращення енергетичного функціонування та підвищення рівня її енергоефективності [26]. Отже, бенчмаркінг енергоефективності слід розглядати як елемент СЕМ [83], а основою його побудови повинен бути цикл Демінга - PDCA для забезпечення постійного поліпшення енергоефективності об'єкту.

2.2 Інструментарій оцінювання рівня енергоефективності з позицій бенчмаркінгу

2.2.1 Математична постановка задачі бенчмаркінгу енергоефективності

Нехай досліджувана СТС складається зі скінченної множини O_0 об'єктів O_i , $O_0 = \{O_i | i = \overline{1, N}\}$, де N – кількість об'єктів. Кожний об'єкт $O_i \in O_0$ характеризує скінченна множина властивостей $\Phi_0 = \{\Phi_j | j = \overline{1, k}\}$, де k – кількість властивостей [202], що характеризують ефективність енергоспоживання. Оскільки процес дослідження виконується не на сукупності об'єктів та властивостей, а на їх реалізаціях, то кожен об'єкт описано скінченною множиною атрибутів-характеристик (показників) енергоефективності $X_0 = \{X_j | j = \overline{1, M}\}$, де M – кількість показників енергоефективності, які відображають властивість Φ_0 . Кожний показник $X_j \in X_0$ піддається аналізу по відношенню до всіх об'єктів. Показники енергоефективності за різними критеріями формують вектор значень вихідних характеристик $x^{(o)} = (x_1^{(o)}, \dots, x_m^{(o)})$ об'єкту O . Об'єкти дослідження O_i утворюють точки $O_i = [X_j^i]$, які розміщено в k -мірному просторі об'єктів, де кожна з властивостей, що описує об'єкт O_i , представлена у вигляді осі координат k -мірного простору об'єктів. Задля рейтингування об'єктів на основі набору вхідних характеристик необхідно:

- відповідно до постановки задачі бенчмаркінгу сформулювати набір інформативних атрибутів-характеристик (показників) енергоефективності;

- визначити шляхом послідовних математичних перетворень числову зведену оцінку $K^{(o)}$ енергоефективності об'єкту;
- визначити порядкове місце кожного об'єкту $O_i \in O_0$ в групі $O_0 = \{O_i | i = \overline{1, N}\}$ об'єктів бенчмаркінгу;
- встановити кількість кластерів для розподілу між ними об'єктів бенчмаркінгу, поставити їм у відповідність кількісну оцінку і надати лінгвістичну оцінку енергоефективності для кожного кластеру;
- отримати оцінку рівня енергоефективності i -го об'єкту.

Слід зазначити, що оцінювання може здійснюватися з урахуванням пріоритетності окремих показників чи їх підмножини і має кілька модифікацій. Проблема багатокритеріального оцінювання та впорядкування об'єктів певної вибіркової множини характеризується трьома чинниками [203]: $\{g, v, K\}$, де g - метод нормалізації (застосовується для переходу до порівняльних шкал значень показників енергоефективності і рейтингового оцінювання об'єкту); v - співвідношення пріоритету вектору вагових коефіцієнтів (v_1, \dots, v_m) на компонентах відповідних показників, (визначення вагових коефіцієнтів $(v_i, i = 1, \dots, m)$ показників енергоефективності, що визначають рейтинг конкретного об'єкту у вибірці); K - критерій згортки (інтегрований (синтезований) показник, згідно з яким визначається рейтинг об'єкту у вибірці). Для побудови зведеної багатокритеріальної оцінки енергоефективності СТС необхідно однозначно визначити такі математичні об'єкти [204]:

- 1) функції $f_i = \psi(x_i)$, $i = 1, \dots, m$, що визначають шкали, за якими вимірюються вихідні характеристики;
- 2) функції нормування $z_i = z_i(f_i) \in [0; 1]$, $i = 1, \dots, m$, що перетворюють вихідні характеристики у окремі показники енергоефективності об'єкту дослідження;
- 3) синтезуючу функцію m змінних $K = K(z) \in [0; 1]$, що визначає вид зведеного показника енергоефективності об'єкту дослідження;
- 4) m -вимірний вектор вагових коефіцієнтів $v = (v_1, \dots, v_m)$, які є параметрами синтезуючої функції $K = K(z; v)$.
- 5) конкретну числову зведену оцінку рівня енергоефективності

$$K^{(o)} = K(z^{(o)}; v) = K(z(f(x^{(o)})); v) = K(z(f(x_1^{(o)})), \dots, z(f(x_m^{(o)})); v) \quad (2.1)$$

об'єкта, описаного вектором значень вихідних характеристик $x^{(o)} = (x_1^{(o)}, \dots, x_m^{(o)})$.

Під час оцінювання енергоефективності СТС, на кожному з описаних етапів побудови присутня невизначеність, зумовлена недостатністю вихідної інформації, обмеженістю інформації щодо вагових коефіцієнтів (значимості) окремих показників. Наявність такої невизначеності задання зведеного показника призводить до того, що об'єкту p співставляється не одна зведена оцінка (2.1), а ціла множина $\tilde{K}_i^{(o)} = \{K_i^{(o)}, o \in O\}$ таких оцінок [204]. Отже, оцінкою i -го об'єкту дослідження стає випадкова величина $\tilde{K}^{(j)}$, а порівняння j -го та q -го об'єктів, що описуються векторами вихідних характеристик $x^{(j)} = (x_1^{(j)}, \dots, x_m^{(j)})$ і $x^{(q)} = (x_1^{(q)}, \dots, x_m^{(q)})$ відповідно, зводиться до порівняння випадкових величин $\tilde{K}^{(j)}$ та $\tilde{K}^{(q)}$ [204].

2.2.2 Суть застосування рейтингової оцінки для багатомірного аналізу енергоефективності об'єкту та огляд інструментів рейтингування

Для кількісної оцінки енергоефективності інтерес представляють методи та підходи, які ґрунтуються на багатофакторному аналізі ефективності енергоспоживання. При цьому, потрібно застосовувати механізм, який би дозволив здійснювати аналіз різнопараметричних показників, що мають різний вплив на ефективність енергоспоживання. Через складність одночасного контролю великої кількості різних показників широкого використання набули процедури, які передбачають обчислення рейтингу об'єкту. В загальному випадку, рейтингування – метод порівняльного оцінювання кількох об'єктів, в основу якого покладено узагальнену характеристику об'єкта за деякою властивістю, яка дозволяє групувати об'єкти в певній послідовності за ступенем зменшення даної властивості. При цьому, ранг характеризує порядкове місце об'єкта дослідження в групі. Визначення рангу забезпечує процедура упорядкування об'єктів з використанням порядкової шкали оцінювання, яка розташовує їх за ознакою «більше-менше», не вказуючи при цьому наскільки більше чи наскільки менше [203]. Тобто, ранг об'єкту є порівняльною оцінкою енергоефективної переваги об'єкту, визначеної на основі відповідних ха-

рактистик, що визначають ефективність його енергоспоживання, чи показників енергоефективності. Результатом рейтингової оцінки як багатофакторного аналізу є віднесення об'єкта до певної групи, класу [203]. Отже, рейтинг є індивідуальною оцінкою рівня енергоефективності. Під час формування принципів побудови рейтингу для оцінювання рівня енергоефективності СТС необхідно враховувати такі поняття, як комплексність та порівнюваність. При цьому під комплексною оцінкою рівня енергоефективності СТС розуміється характеристика, отримана в результаті одночасного і узгодженого вивчення сукупності показників, що відображають всі (або більшість) аспекти ефективності енергоспоживання, та яка містить узагальнені висновки щодо результатів СТС у сфері енергоефективності.

Серед методів рейтингування (рис. 2.3) окреме місце займають методи класифікації об'єктів за рівнем енергоефективності, які забезпечують розподіл об'єктів на групи подібних [28]. Аналіз літератури, присвяченої вирішенню задачі класифікації об'єктів [205-207], дозволяє виділити [208]:

- підхід, заснований на використанні апарату математичної теорії розпізнавання образів, в тому числі: розпізнавання без навчання (автоматична класифікація, або кластерний аналіз - дозволяє згрупувати об'єкти в однорідні групи без використання додаткової інформації про показники, але інтерпретація результатів групування можлива лише із залученням експертів; апарат нейронних мереж (карти Кохонена) - дозволяє виявляти приховані структури й закономірності за допомогою навчання нейронних мереж, побудова нейромережі відбувається на основі вхідних даних, проте, необхідною є достатня репрезентативність навчальної вибірки, інтерпретація результатів є проблематичною); розпізнавання з навчанням (дискримінантний аналіз - дозволяє розділити об'єкти на однорідні групи, однак потрібна наявність навчальних вибірок, які формуються із залученням експертів);

- підхід, побудований на основі багатовимірної нечіткої класифікації з навчанням - дозволяє розділити об'єкти на групи на підставі обчислених значень функції приналежності; можливе використання як кількісної, так і якісної інформації; однак для формування навчальних вибірок потрібне залучення експертів.

Спільним для всіх методів класифікації є формування груп об'єктів за їх по-

дібністю у просторі класифікаційних характеристик, при цьому постає задача формування наборів інформативних незалежних класифікаційних змінних, а результати класифікації залежать від обраного методу та стратегії класифікації [28].

Методи кількісної рейтингової оцінки базуються на різних підходах: визначенні відстані від еталону; суми балів; парному порівнянні; імовірнісному підході; параметричному і непараметричному, стохастичному і детермінованому граничному підходах (рис. 2.3). Результатом кількісної оцінки рівня енергоефективності є позиціонування об'єкту дослідження серед інших. Наведена на рис. 2.3 класифікація не претендує на повноту урахування всіх підходів та методів рейтингового оцінювання, а відображає лише найбільш широко застосовувані.

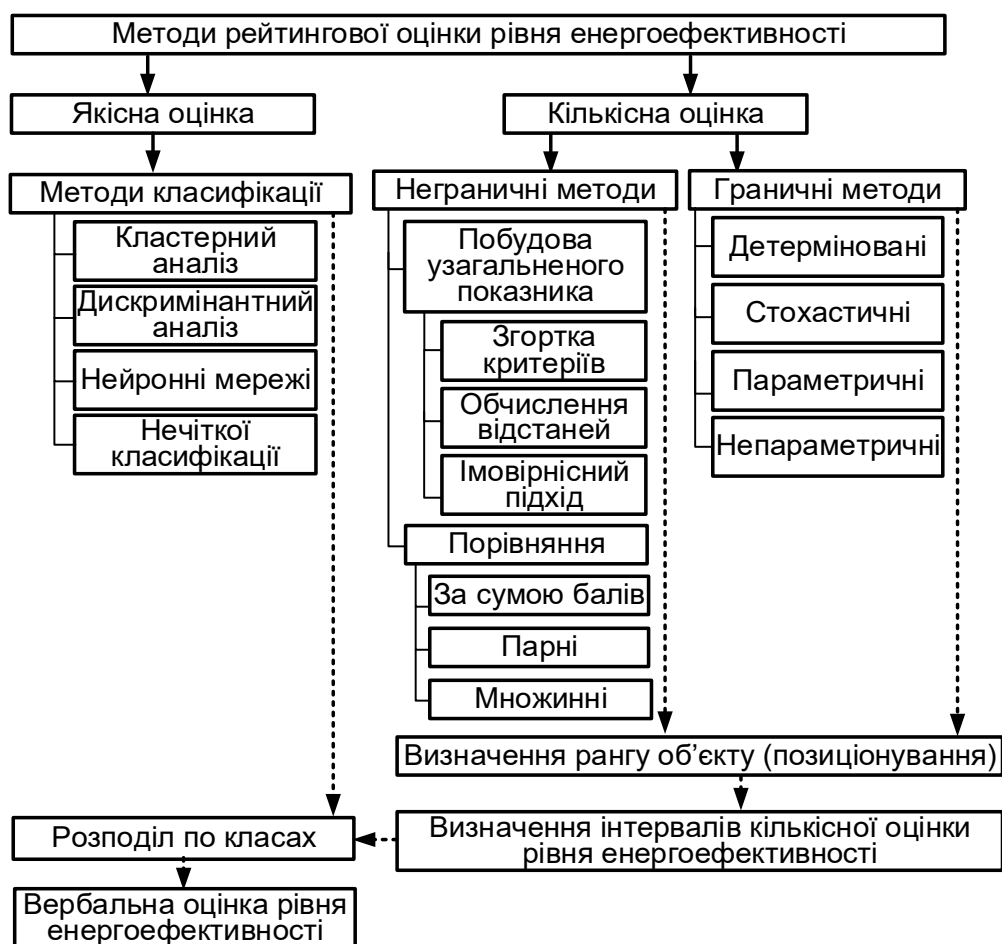


Рисунок 2.3 – Класифікація методів рейтингового оцінювання рівня енергоефективності та суть їх використання

Низка підходів до багатокритеріальної оцінки енергоефективності базується на формуванні комплексного (інтегрального) показника енергоефективності [201, 210-213]. Індексний підхід - простий у використанні, дозволяє отримати інтегра-

льні оцінки для кожного об'єкта, але вимагає наявності додаткової інформації для кожного показника, в тому числі, експертних оцінок для вагових коефіцієнтів, які враховують важливість показників [202, 206, 207]. Існує багато методів побудови агрегованих, інтегральних чи узагальнюючих, синтетичних показників рівня енергоефективності. Відмінність методів полягає в різних способах редукції показників-ознак [202, 212-214]: виділення головного критерію; згортки критеріїв; обчислення відстаней. Недолік методу виділення головного критерію полягає в тому, що порівняння проводиться тільки за одним критерієм, а значення інших не враховуються. Вибір того чи іншого виду згортки визначається характером взаємозв'язків складових її критеріїв (рівнозначні, домінуючі тощо), а також деякими спеціальними обмеженнями на область значень згортки, що впливають із специфіки конкретної задачі. Якщо часткові показники неоднорідні, то вони або зводяться до однорідних, або коефіцієнти α_i враховують не тільки важливість, а й фізичну розмірність показника. Метод обчислення відстаней базується на принципах векторно-матричної алгебри, при цьому вводиться спеціальна метрика, що характеризує відстань між об'єктами та використовується як узагальнений критерій.

Імовірнісний підхід як методика оцінки рівня ефективності взагалі базується на використанні теореми Байєса [204, 215], суть якої полягає в розрахунку імовірності справедливості гіпотези в умовах, коли на основі спостережень відома лише деяка частина інформації про подію. Поняття «ефективності СТС» еквівалентне поняттю «ймовірності ефективного функціонування СТС». Ідея імовірнісного підходу до оцінки рівня енергоефективності полягає у представленні інформації про відповідність показників енергоефективності певного об'єкту набору нормативів у вигляді бінарних показників, які є основою для розрахунку імовірності неефективного енергоспоживання. Залучення байєсівського підходу до аналізу інформації відповідно [215] дозволить на основі поточних даних та отриманої в ході спостереження нової інформації щодо показників енергоефективності отримати інформативний показник оцінки енергоефективності.

Широко поширені різні види порівнянь [216]: парні порівняння (з сукупності об'єктів по черзі вибирають можливі пари об'єктів та для кожної пари визнача-

ють, який з них кращий за певною ознакою); множинні порівняння (із сукупності об'єктів складають набори об'єктів, де об'єкти впорядковують в порядку переваги); сумою балів (об'єкти впорядковують за зменшенням (зростанням) заданої ознаки, обчисленої на основі набору показників, що її характеризують) тощо.

Не залежно від обраного методу рейтингування, проблема оцінки енергоефективності містить такі складові [217]: вибір показників для оцінювання (є небезпека не врахування необхідних показників або ж використання нерелевантних через суб'єктивність вибору); необхідність визначення можливих значень вхідних і вихідних показників; необхідність визначення значущості (ваги) показників для порівняння енергоефективності різних об'єктів. Основна складність полягає у визначенні важливості критеріїв, врахування їх фізичної розмірності. Використання методів факторного та регресійного аналізу для вирішення даного завдання дає неоднозначні результати, що ускладнюється багатокритеріальністю енергоефективності. Використання вагових коефіцієнтів для показників енергоефективності не вирішує проблеми, а самі ваги найчастіше носять суб'єктивний характер [218].

Підходом вимірювання енергоефективності, позбавленим таких недоліків, є граничний підхід [218-220]. На основі граничних методів аналізу ефективності в загальному розумінні її характеризують відносно межі ефективності, яка визначається кращими значеннями показників у вибірці. Граничний підхід ґрунтується на представленні об'єкта множиною входів і множиною виходів, що забезпечує зниження ступеня суб'єктивізму в процесі дослідження [218]. Отже, спираючись на ідею граничного підходу, можна передбачити, що існує досяжний максимум результатів (потенціал), що обумовлює енергоефективність об'єкта в поточних умовах, що описується межею енергоефективності. Об'єкт вважається енергоефективним, якщо має місце такий його стан, коли неможливе збільшення жодного з виходів без збільшення хоча б одного входу, або навпаки - неможливе зменшення жодного з входів без зменшення хоча б одного з виходів. Об'єкти, які є енергоефективними за Парето-Купмансу лежать на межі енергоефективності [219, 220]. Відхилення від межі енергоефективності може бути виражене у кількісній формі і пов'язано з неефективністю функціонування через дію множини різних чинників.

В загальному випадку, граничний аналіз базується на підходах, що відрізняються особливостями саме наближення межі ефективності [218]: параметричному і непараметричному. Параметричний підхід передбачає побудову моделі виробничої функції на основі даних вибірки з використанням вектора параметрів. Для отримання оцінок ефективності потрібна специфікація і ідентифікація виробничої функції [218], що відображає перетворення вхідних чинників x в результати y при певному стані факторів зовнішнього середовища, тобто, з урахуванням відхилення u , пов'язаним з неефективним виконанням виробничих завдань ($u \geq 0$), та відхилення ε від межі ефективності, зумовленого неврахованими чинниками: $y = F(x, \varepsilon, u)$. Залежно від припущень, які використовуються для побудови виробничої функції розрізняють стохастичний і детермінований підхід. Проте, саме необхідність побудови виробничої функції зумовлює низку недоліків застосування параметричного підходу, описаних в [218], для його використання до оцінки рівня енергоефективності СТС. Непараметричний підхід заснований на формуванні межі ефективності шляхом її апроксимації за фактичними даними входів і виходів низки об'єктів. Він не передбачає побудови моделі виробничої функції, відповідно, немає потреби в специфікації та ідентифікації виробничої функції. Побудова межі ефективності здійснюється за вибіркою об'єктів, що функціонують у відносно рівних умовах, при цьому досить володіти інформацією про входи і виходи. Межа ефективності формується об'єктами, домінуючими над іншими в просторі виробничих можливостей [218, 219]. Саме це є привабливим моментом для застосування даного підходу для оцінювання рівня енергоефективності СТС.

Слід зазначити, що для енергоменеджера важливим є розуміння отриманих результатів рейтингування, тому завершальним етапом оцінювання рівня енергоефективності є перехід до деякої вербальної характеристики цієї оцінки.

2.2.3 Порівняльний аналіз методів рейтингової оцінки з урахуванням їх застосовуваності до вирішення завдання бенчмаркінгового дослідження

Рейтинговий аналіз не дає змоги безпомилкового доказу абсолютної енергоефективності. Він покликаний сприяти мінімізації негативних наслідків у сфері

енергоспоживання та поглибленого аналізу впливу показників на рівень ефективності енергоспоживання. Рейтингова оцінка виступає в якості інструментарію для оцінювання рівня ефективності енергоспоживання в СТС та управлінських дій у сфері енергоефективності [69]. В цьому випадку вона потребує структурованого підходу до її визначення та застосування.

Незважаючи на велику кількість наукових робіт, присвячених питанню рейтингових оцінок, досі так і не було розроблено систематизованого підходу, який би враховував ієрархічність проблеми енергоефективності СТС та її об'єктів, забезпечував можливість оцінки рівня енергоефективності об'єктів СТС різних ієрархічних рівнів. На основі аналізу суті кожного методу рейтингового оцінювання та прикладів їх застосування [24, 31, 51, 188, 204, 213, 215-219] виконано характеристику найбільш широко застосовуваних методів (табл. 2.1) з точки зору вирішення низки завдань залежно від мети та типу бенчмаркінгу, вибраного об'єкту наслідування тощо.

Застосування методів кількісної рейтингової оцінки дозволяє виконати позиціонування об'єктів за рівнем енергоефективності, виявити «кращі» та «гірші» об'єкти [24, 51], ідентифікувати розрив між еталоном та об'єктом, проте, аналіз причин різниці в енергоефективності та шляхів підвищення її рівня є ускладненим. В нагоді можуть стати методи оцінювання рівня енергоефективності, засновані на засадах багатокритеріальної порядкової класифікації можливих станів об'єкту за окремими класифікаційними характеристиками енергоефективності, які мають вербальні оцінки та агрегуються в складові критерії вищих рівнів. Таке агрегування забезпечує формування ієрархічної системи класифікаційних критеріїв для комплексного оцінювання рівня енергоефективності [18, 36, 84]. На основі побудованих градацій шкали оцінок складових критеріїв визначається належність об'єкту дослідження до одного з впорядкованих за рівнем ефективності енергоспоживання класів по кожному з критеріїв. Це не лише забезпечує оцінку рівня енергоефективності об'єкту, а й сприяє виявленню шляхів удосконалення технологічного процесу [18, 36].

Таблиця 2.1 – Характеристика методів рейтингового оцінювання

Метод		Бінарних характеристик	Байєсівський підхід	Борда	Кондорсе	Копленда	Таксономічний	DEA	Багатокритеріальної класифікації
Тип оцінки	кількісна	v	v	+	+	+	+	+	-
	якісна	+	+	v	v	v	v	v	+
Наявність партнерів бенчмаркінгу		+	+	+	+	+	+	+	-
Оцінювання без партнерів бенчмаркінгу		-	-	-	-	-	-	-	+
Вид еталону	середній	+	+	-	-	-	-	-	-
	кращий	-	v	+	+	+	v	+	-
	ідеальний	-	-	-	-	-	+	+	-
Визначення відстані від еталону (ідентифікація розриву), в тому числі по кожному показнику		v	-	+	-	-	+	+	-
Тип бенчмаркінгу	внутрішній	+	-	v	v	v	+	v	+
	зовнішній	+	+	+	+	+	+	+	+
Експрес-оцінка (самооцінка)		v	-	-	-	-	-	-	+
Позиціонування об'єктів		v	v	+	+	+	+	v	-
Визначення причин низького рівня енергоефективності		-	-	-	-	-	-	-	+
Типологізація за рівнем енергоефективності		+	+	+	+	+	+	+	+
Необхідність достатньої кількості об'єктів у випадку великого набору показників енергоефективності		-	+	-	-	-	-	+	-

Примітка: «+» - так; «v» - можливо; «-» - ні

2.3 Оцінювання рівня енергоефективності водопровідних господарств на регіональному рівні із застосуванням непараметричного граничного підходу

2.3.1 Обґрунтування вибору методу рейтингового оцінювання

Непараметричний підхід традиційно асоціюється з методом аналізу оболонки даних - Data Envelopment Analysis (DEA) [219-222]. В основу даного методу покладено алгоритм знаходження значень узагальненого критерію ефективності об'єктів шляхом згортання часткових критеріїв. DEA є способом подолання суб'єктивного характеру визначення важливості показників. Методологія DEA заснована на принципах лінійного програмування. Метод DEA ґрунтується на побудові непараметричної охоплюючої межі над низкою об'єктів (Decision Making Unit - DMU), кожному з яких відповідає точка в багатомірному просторі вхідних та вихідних змінних, так, щоб всі спостережувані точки лежали нижче або на кривій граничної ефективності [219-222]. Оцінка ефективності групи об'єктів виконується відносно цієї межі.

Застосування методу DEA для конструювання межі енергоефективності та обчислення відносної енергоефективності низки об'єктів дозволяє одночасно враховувати множину входів і виходів, вимірюючи енергоефективність об'єкту як зважену суму виходів по відношенню до зваженої суми входів [219-222]. Обмеженням є умова, що енергоефективність об'єкта не може перевищувати одиницю. Отримані з DEA вагові коефіцієнти окремих вхідних і вихідних показників індивідуальні для кожного об'єкта і приймають такі значення, при яких показник відносної енергоефективності приймає максимально можливе значення. При цьому максимальна енергоефективність виражає не абстрактний ідеал або усереднене значення по групі, а найкраще досяжне в даній групі значення. Межа енергоефективності «оточує» всі неенергоефективні об'єкти. Для них DEA шляхом їх проектування на межу енергоефективності визначає набір коефіцієнтів, що вказує, які центри формують для об'єкту референтну групу, тобто, еталонний гіпотетичний об'єкт. Еталонний об'єкт, як правило, є комбінацією кількох реальних об'єктів, які є енергоефективними, і визначає завдання для неенергоефективного об'єкта в сен-

сі досягнення Парето-ефективності. Отримані значення коефіцієнтів дають можливість зрозуміти причини недостатнього рівня енергоефективності та напрямки розвитку об'єкту дослідження.

Аналіз суті методу DEA та прикладів його застосування вказує на низку його привабливих властивостей, а саме [208-225]: відносна простота застосування; дозволяє проводити аналіз енергоефективності у випадках, коли важко формально пояснити взаємозв'язок між складовими, що мають вплив на ефективність енергоспоживання об'єкту; для його реалізації необхідні тільки значення вхідних і вихідних показників об'єктів; дозволяє обчислити один агрегований показник для кожного об'єкта в термінах використання вхідних і вихідних параметрів, не вимагаючи апріорного задання для них вагових коефіцієнтів під час вирішення задачі оптимізації; може одночасно обробляти багато входів і виходів, кожен з яких може вимірюватися в різних одиницях виміру, що дозволяє уникнути одноваріантності розрахунків (проблема нормування вхідних та вихідних даних вирішується в процесі вирішення задачі лінійного програмування), тобто, у випадку зміни одиниць виміру значення показника енергоефективності не зміниться (властивість інваріантності); не накладає обмежень на функціональну форму залежності між входами і виходами (кусочно-лінійна межа є непараметричною), форму розподілу випадкової похибки, але при цьому формує Парето-оптимальну множину точок, відповідну енергоефективним об'єктам; виробляє конкретні оцінки бажаних змін у входах / виходах, які дозволили б вивести неенергоефективні об'єкти на межу енергоефективності; концентрується на виявленні прикладів кращої практики (best practice), а не на усереднених тенденціях. У випадку використання статистичних даних за кілька років з'являється можливість простежити переміщення межі енергоефективності в часі. На підставі напрямку цих переміщень можна визначити, чи має місце прогрес (регрес) в досліджуваній групі об'єктів.

Проте метод DEA має наступну особливість: він дозволяє оцінювати лише відносну енергоефективність об'єктів, тобто у порівнянні один з одним. У випадку невеликого числа об'єктів застосування DEA є недоцільним: доведеться відмовитися від деяких істотних критеріїв, або визнати всі об'єкти оптимальними.

2.3.2 Математична постановка задачі та вибір математичної моделі методу аналізу середовища функціонування

Непараметричний підхід заснований на формуванні межі енергоефективності шляхом її апроксимації за фактичними даними входів і виходів низки об'єктів.

Нехай досліджувана сукупність включає n об'єктів: $O = (O_1, O_2, \dots, O_n)$. Кожен об'єкт має m входів та k виходів. Для кожного i -го об'єкта вектор входу має вигляд $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})^T$, а вектор виходу – $Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{ik})^T$. Матриця вхідних параметрів X має розмір $(m \times n)$, а матриця вихідних параметрів Y – $(k \times n)$. Необхідно дослідити відносну енергоефективність θ сукупності з n об'єктів [219]:

$$\theta_i = \frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{ir}}{\sum_{j=1}^m v_j x_{ij}}, \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad (2.2)$$

де u_r ($r=1, \dots, k$), v_j ($j=1, \dots, m$) – невідомі вагові множники.

Базова дробово-лінійна модель DEA передбачає послідовну для всіх об'єктів максимізацію енергоефективності (2.2) на множині довільних невід'ємних ваг u, v за умови, що для інших об'єктів це відношення не перевищує одиниці:

$$\theta_i = \frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{ir}}{\sum_{j=1}^m v_j x_{ij}} \xrightarrow{u,v} \max; \quad (2.3)$$

$$\frac{\sum_{r=1}^k u_r y_{ir}}{\sum_{j=1}^m v_j x_{ij}} \leq 1; \quad (2.4)$$

$$u_r > 0, \forall r \in \overline{1, k}; \quad v_j > 0, \forall j \in \overline{1, m} \quad (2.5)$$

Очевидно, що для енергоефективних об'єктів $\max \theta_i = 1$.

За результатами DEA аналізу необхідно визначити: межу енергоефективності, що складається з енергоефективних об'єктів; відносну міру енергоефективності,

сті – відстань від DMU до межі енергоефективності; енергоефективну мету для об'єкту дослідження - проекцію точки на межу енергоефективності.

Метод DEA потребує поділу змінних на входні і вихідні. У випадку, коли між змінними немає безпосереднього технологічного зв'язку, слід використовувати такий підхід [218, 219]: показники, для яких доцільним є їх зменшення, слід відносити до входних змінних, а показники, для яких доцільним є їх збільшення - до вихідних змінних. Тоді для неенергоефективних об'єктів буде рекомендовано зниження значень входних змінних і збільшення значень вихідних змінних.

Важливим питанням при виборі DEA-моделі є вибір форми межі [223]. У випадку припущення про незмінність показників енергоефективності при масштабуванні DMU, мова йде про постійну віддачу від масштабу (Constant Returns To Scale - CRS) і межа є кусочно-лінійною. У випадку припущення, що формалізована оцінка змінюється при масштабуванні DMU, мова йде про змінну віддачу від масштабу (Variable Returns To Scale - VRS) і межа є опуклою кусочно-лінійною. CRS-модель, застосовується тоді, коли всі об'єкти функціонують в умовах оптимального масштабу. В іншому випадку застосовується VRS-модель, яка дає змогу здійснювати бенчмаркінг енергоефективності об'єктів подібного розміру.

Можливе використання таких моделей DEA-аналізу [219-223]:

- модель, орієнтована на вхід (input-oriented), яка передбачає мінімізацію входних параметрів за умови наявних результатів. У випадку застосування формулювання двоїстої задачі програмування (спираючись на теорему двоїстості) модель має вигляд:

$$\begin{aligned} \theta = f(\lambda X; Y) &\rightarrow_{\lambda} \min; \\ -y_i + Y\lambda &\geq 0; \\ \theta x_i - X\lambda &\geq 0; \\ \lambda &\geq 0; \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1; \end{aligned} \tag{2.6}$$

- модель, орієнтована на вихід (output-oriented), яка передбачає максимізацію результатів за наявних входних параметрів:

$$\begin{aligned}
\phi &= f(X; \lambda;) \rightarrow \max; \\
-\phi y_i + Y\lambda &\geq 0; \\
x_i - X\lambda &\geq 0; \\
\lambda &\geq 0; \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1,
\end{aligned} \tag{2.7}$$

де θ, ϕ - міра енергоефективності j -го об'єкта, що характеризує величину пропорційного зменшення входів за умови не зменшення продуктивності;

λ – вектори констант (вагових коефіцієнтів) розмірності $N \times 1$;

x_i, y_i - вектор-стовпці вхідних і вихідних показників для i -го об'єкта.

Врахування змінної віддачі від масштабу забезпечує саме введення в модель умови $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Відносною мірою енергоефективності i -го об'єкта є значення θ_i .

Емпіричне наближення межі енергоефективності описується множиною [218]:

$$EE = \left\{ (x^E, y^E) \in T : x^E = \lambda x; y^E = y\lambda; \lambda \geq 0; (x, y) \in T \right\} \tag{2.8}$$

де $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T$ – вектор коефіцієнтів лінійної комбінації, яка описує межу енергоефективності для вибірки об'єктів розмірності n ;

T - множина всіх комбінацій входів і виходів, що забезпечують зв'язок x та y ;

(X^E, y^E) - комбінація входів і виходів, що лежить на межі енергоефективності.

Якщо для деякого підприємства n виконано [218]:

$$(x_n, y_n) = (x_n^E, y_n^E) = \left(\sum_{i=1}^n \lambda x_i, \sum_{i=1}^n \lambda y_i \right) \tag{2.9}$$

за умови $\lambda \geq 0$, то рівень фактичних результатів з точки зору енергоефективності відповідає граничному (потенційному) серед оцінюваних об'єктів.

Різні об'єкти можуть мати однакові оцінки енергоефективності θ_i . Чим ближче θ_i до одиниці, тим вище енергоефективність i -го об'єкта. Об'єкти, для яких $\theta=1$, знаходяться на межі енергоефективності. Це свідчить про енергоефективність об'єкта і неможливість скорочення входів без втрат продуктивності.

Суть застосування методу DEA демонструє рис. 2.4 [223].

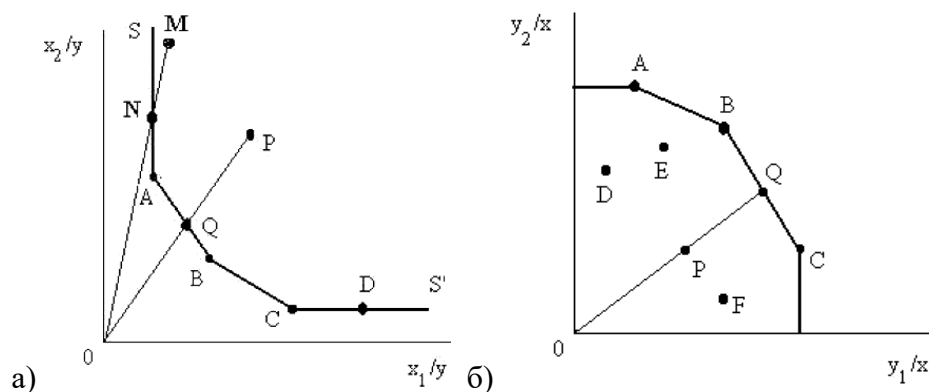


Рисунок 2.4 – Візуалізація суті методу DEA:

а) орієнтація моделі на вхід; б) орієнтація моделі на вихід

Для спрощення візуалізацію виконано в припущенні постійної віддачі від масштабу [223], що дає змогу зобразити графік в координатах $(x_1/y, x_2/y)$ у випадку моделі орієнтованої на вхід (рис. 2.4,а) та в координатах $(y_1/x, y_2/x)$ у випадку моделі орієнтованої на вихід (рис. 2.4,б). Ламана лінія SS' є межею енергоефективності. Об'єкти, яким відповідають точки A, B, C є енергоефективними. Об'єкти, яким відповідають точки D, E, F, M і P - неенергоефективні. Показник енергоефективності для об'єкту, якому, наприклад, відповідає точка P : $K = OQ/OR$, де точку Q отримано шляхом проектування точки P на межу енергоефективності.

В результаті проектування неенергоефективного об'єкта на межу енергоефективності для нього формується цільовий гіпотетичний об'єкт, який є енергоефективним і в математичному сенсі являє собою лінійну комбінацію реальних енергоефективних об'єктів (кожному реальному об'єкту відповідає точка в багатовимірному просторі). Число об'єктів, що входять в цю комбінацію, залежить від низки чинників (кількості вхідних і вихідних змінних, що описують об'єкти, значень цих змінних). Значення вхідних і вихідних змінних цільового об'єкта є цілями (завданнями) для неенергоефективного об'єкту.

Умова $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ забезпечує те, що множина EE є опуклою (симплекс-множиною).

В цілому рішення наведених завдань (2.6) і (2.7) наближають межу енергоефективності, яка представляє собою опуклу оболонку множини виробничих можливостей об'єкту з точки зору ефективності енергоспоживання, утворену шляхом відсікання півплощин, що проходять через суміжні, граничні точки.

Слід зазначити, що у випадку моделі, орієнтованої на вихід, значення змінної ϕ буде більшим або рівним одиниці. Для отримання ж традиційного значення міри енергоефективності використовується обернена величина: $\theta=1/\phi$, [219, 223]. Скаляр θ є мірою ефективності i -го об'єкта, при цьому $\theta \in (0; 1]$. Вектор констант $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T$ відображає ступінь подібності i -го об'єкта іншим об'єктам досліджуваної сукупності з точки зору співвідношень значень змінних. Аналогічне завдання вирішується для кожного об'єкта, тобто n раз.

Виходячи із завдання ефективного енергоспоживання, забезпечення якого можливе за умови зниження витрат та втрат для порівняння об'єктів за рівнем енергоефективності доцільною є модель із змінним ефектом масштабу з орієнтацією на вхід. Обґрунтуванням вибору моделі є такі міркування. По-перше, високі питомі витрати електроенергії можуть бути зумовлені особливостями будови СКВ, при цьому має місце високий рівень реалізації води. По-друге, високі питомі витрати електроенергії можуть бути зумовлені незадовільним станом водопровідної мережі та неефективною організацією режиму водоподачі, при цьому має місце низька частка реалізації води, висока частка витрат на власні потреби та втрат води. Тому, під час порівняння об'єктів і вибору об'єктів-еталонів необхідно враховувати умови роботи об'єктів, щоб для об'єктів певного типу організації процесу водопостачання в якості еталонів призначалися об'єкти, що мають такий же тип роботи. Саме у моделях із змінним ефектом масштабу кожен неенергоефективний об'єкт зіставляється з енергоефективними об'єктами, що мають структуру значень показників, найбільш близьку до структури цього об'єкта.

2.3.3 Рейтингування водопровідних господарств за рівнем енергоефективності на рівні регіонів

Для практичного застосування DEA-моделі в оцінці відносної енергоефективності ВГ регіонів використано програмний продукт DEAFrontier™ [226]. Для проведення процедури ранжування об'єктів дослідження в якості вхідних x_i показників енергоефективності вибрано: питоме електроспоживання, коефіцієнт втрат та коефіцієнт технологічних витрат води (Додаток Б). Їх значення обчислено на

основі загальноприйнятих звітних даних про роботу ВГ регіонів, наведених в [91-97]. В якості вихідного y_i показника вибрано характеристику ефективності функціонування ВГ як суб'єкта господарської діяльності - об'єм реалізованої води.

В основі оцінки енергоефективності регіонів лежить процедура побудови межі енергоефективності, яка має форму опуклої оболонки, і вивчення розташування об'єктів дослідження відносно цієї межі. Мірою енергоефективності неенергоефективного об'єкту є віддаленість точки від межі [218, 219, 223]. Результатом DEA-аналізу є ранжування регіонів за рівнем енергоефективності (табл. 2.2, рис.2.5) і установка цілей для неенергоефективних регіонів щодо досягнення певних значень показників (ВГ Донецької та Луганської областей виключені з розгляду, зважаючи на складність отримання інформації про результати їх роботи). Об'єкти, у яких міра енергоефективності дорівнює одиниці, є лідерами. Аналіз структури вхідних і вихідних змінних (рис. 2.6) об'єктів бенчмаркінгу свідчить: кращими об'єктами є ті, які мають низький рівень втрат та значення питомого електроспоживання на фоні високого рівня реалізації води.

Реалізація DEA-аналізу забезпечує автоматичне формування переліку бенчмарків для неенергоефективних об'єктів ($\theta < 1$). ВГ трьох регіонів (Волинська, Чернігівська, Івано-Франківська область) є енергоефективними у порівнянні з іншими і слугують орієнтирами для ВГ інших регіонів. Вагові коефіцієнти, що приписуються еталонним регіонам, означають величину «вкладу» даного еталонного регіону в гіпотетичний об'єкт, який є цільовим регіоном для неенергоефективного регіону. Наприклад, для ВГ Чернівецької області еталонною множиною є ВГ Волинської (з вагою 0,522) та ВГ Чернігівської областей (з вагою 0,478). Ваговий коефіцієнт ВГ Волинської області більший, ніж ВГ Чернігівської, отже структура показників ВГ Чернівецької області ближче (правда незначно) до структури ВГ Волинської області. Середнє значення показника енергоефективності 0,713, мінімальне значення - 0,409, стандартне відхилення - 0,197, що вказує на достатню однорідність регіонів. Значно відстають ВГ Чернівецької, Львівської, Харківської областей (показник ефективності є меншим 0,5).

Таблиця 2.2 – Результат оцінки енергоефективності ВГ регіонів та еталонні ВГ (бенчмарки)

№ з/п	Об'єкт ВГ (область)	Показник енерго-ефективності, θ	Ранг	Еталонні ВГ регіонів та коефіцієнти, з якими вони формують гіпотетичний об'єкт			
				Ваговий коефіцієнт	Еталонний об'єкт (область)	Ваговий коефіцієнт	Еталонний об'єкт (область)
1.	Волинська	1,000	1	1,000	Волинська		
2.	Івано-Франківська	1,000	1	1,000	Івано-Франківська		
3.	Чернігівська	1,000	1	1,000	Чернігівська		
4.	Рівненська	0,987	4	0,614	Івано-Франківська	0,386	Волинська
5.	Херсонська	0,955	5	1,000	Чернігівська		
6.	Хмельницька	0,927	6	0,742	Волинська	0,258	Чернігівська
7.	Одеська	0,800	7	0,701	Волинська	0,299	Чернігівська
8.	Київська	0,759	8	1,000	Чернігівська		
9.	Миколаївська	0,716	9	1,000	Чернігівська		
10.	Житомирська	0,709	10	0,709	Волинська	0,291	Івано-Франківська
11.	Сумська	0,704	11	1,000	Чернігівська		
12.	Дніпропетровська	0,694	12	0,740	Чернігівська	0,260	Волинська
13.	Полтавська	0,692	13	0,715	Волинська	0,285	Чернігівська
14.	Тернопільська	0,687	14	0,991	Чернігівська	0,009	Волинська
15.	Черкаська	0,670	15	1,000	Чернігівська		
16.	Вінницька	0,531	16	1,000	Чернігівська		
17.	Кіровоградська	0,5148	17	0,974	Чернігівська	0,026	Волинська
18.	Запорізька	0,5145	18	0,889	Чернігівська	0,111	Волинська
19.	Закарпатська	0,497	19	0,556	Волинська	0,444	Чернігівська
20.	Харківська	0,489	20	0,544	Чернігівська	0,456	Волинська
21.	Львівська	0,427	21	0,982	Чернігівська	0,018	Волинська
22.	Чернівецька	0,409	22	0,522	Волинська	0,478	Чернігівська

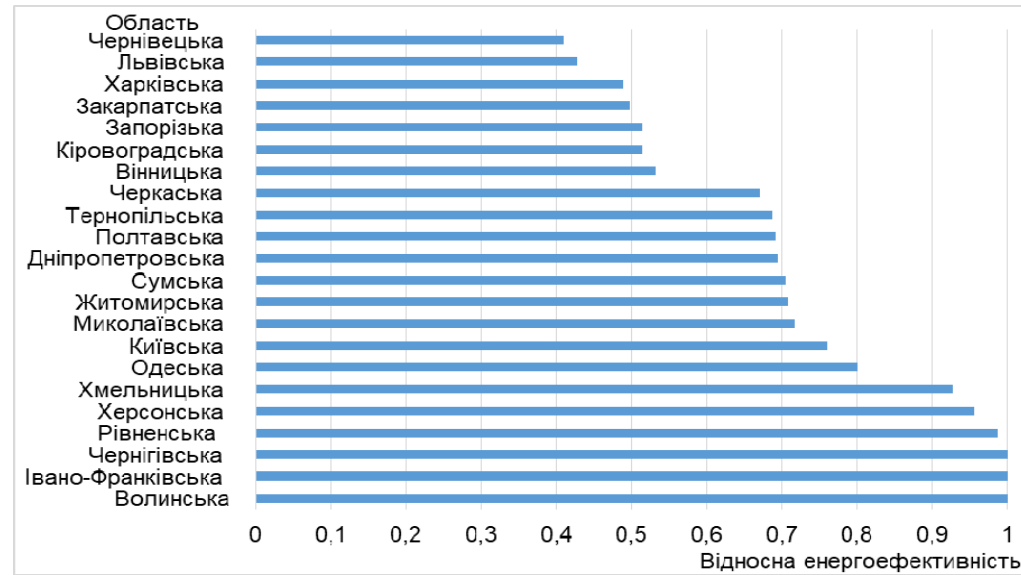


Рисунок 2.5 – Результати рейтингування ВГ регіонів за показником відносної енергоефективності

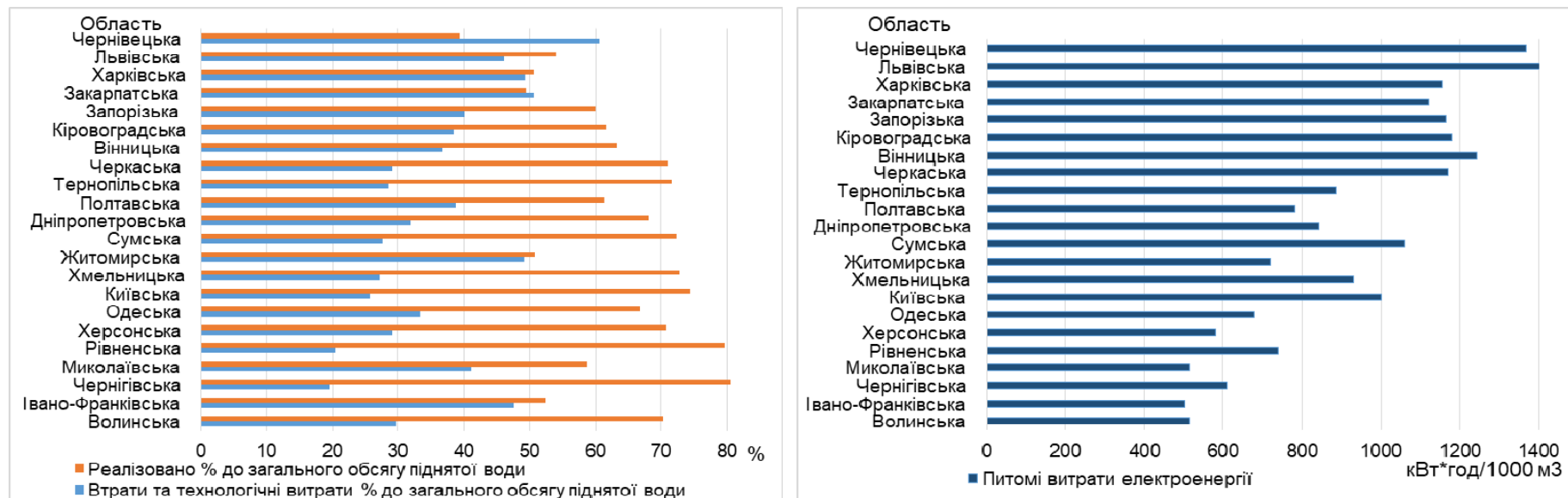


Рисунок 2.6 – Структура вхідних та вихідних змінних ВГ регіонів

Метод DEA забезпечує встановлення цілей щодо підвищення рівня енергоефективності неенергоефективних об'єктів, які полягають в пропорційному скороченні їх вхідних факторів на величину θ при збереженні вихідних значень на початковому рівні. Рекомендовані значення показників:

$$x_i^{\text{рекоменд}} = \theta_i x_i, \quad (2.10)$$

де θ_i - показник ефективності i -го (неенергоефективного) об'єкта;

x_i - вектор значень вхідних змінних для i -го об'єкта.

Якщо неенергоефективні ВГ регіонів досягнуть рекомендованих значень показників, то вони вийдуть на межу енергоефективності. Для енергоефективних ВГ регіонів рекомендовані значення показників збігаються з вихідними значеннями. Отже, однією з переваг використання DEA-аналізу є можливість визначити, які саме входи та виходи слід змінити кожному неенергоефективному об'єкту, а також на скільки їх необхідно зменшити.

2.3.4 Класифікація водопровідних господарств регіонів шляхом побудови набору меж енергоефективності

Завдання типологізації об'єктів на основі оцінок енергоефективності полягає у виявленні загальних властивостей непересічних груп об'єктів за деяким критерієм. Проблеми, що виникають під час поділу об'єктів на групи за рівнем енергоефективності, з одного боку пов'язані з множинністю критеріїв, з іншого з істотною залежністю результатів від використовуваного методу [28].

Використовуючи ідею кластерного аналізу та метод DEA, в роботах [224, 227, 228] запропоновано формувати не одну межу ефективності, а їх набір. Основна ідея запропонованого в [224, 227] підходу полягає у використанні методу DEA як механізму класифікації об'єктів в багатовимірному просторі вхідних і вихідних змінних, в якому попередньо будуються розділяючі поверхні (межі ефективності), що мають форму опуклих оболонок, вкладених одна в одну. Отже, із застосуванням ідеї даного підходу може бути побудована множина меж енергоефективності шляхом покрокового оцінювання енергоефективності групи об'єктів, з якої на кожному наступному кроці видалено енергоефективні об'єкти. Це дає

змогу реалізувати принципи багатовимірної класифікації для розбиття сукупності багатовимірних об'єктів на класи, однорідні в сенсі енергоефективності. Процедура передбачає виконання таких етапів [224, 227]:

Крок 1. Сформувані вихідну сукупність об'єктів-партнерів бенчмаркінгу $O=O_i$, де $i=0$.

Крок 2. Сформувані матриці входів X_i та виходів Y_i розмірністю, відповідно, $m \times n$ і $k \times n$, де n – кількість об'єктів вихідної сукупності O .

Крок 3. Виконати DEA-аналіз енергоефективності об'єктів сукупності O_i .

Крок 4. Об'єкти, для яких показник енергоефективності $\theta = 1$, об'єднати в сукупність (множину) F_j , де $j=i+1$.

Крок 5. Видалити сукупність об'єктів F_j з сукупності O_i та отримати нову сукупність об'єктів O_j , де $j=i+1$.

Крок 6. Якщо отримана множина $O_j = \emptyset$, то крок 9.

Крок 7. Отримати матриці X_j і Y_j шляхом переформування матриць X_i і Y_i (видалення рядків, що відповідають енергоефективним об'єктам).

Крок 8. Прийняти $i = j$ та перейти до кроку 3.

Крок 9. Кінець.

Кроки 3-8 повторюються, формуючи кластери F_j і переформовуючи сукупність об'єктів O , до тих пір, доки множина $O_j \neq \emptyset$. В результаті буде отримано множину сукупностей об'єктів $F = \{F_j\}, j = 1, \dots, J$, що лежать на межі енергоефективності відповідного рівня. Сукупність об'єктів F_1 є межею енергоефективності першого рівня, сукупність F_2 – другого рівня і т.д.

Результатом роботи алгоритму є набір класів, що містять об'єкти, однорідні в сенсі енергоефективності з урахуванням їх подібності у структурі показників в просторі вхідних/вихідних змінних, а не в сенсі відстані в просторі показників (як в кластерному чи дискримінантному аналізі) [224].

У результаті застосування покрокової побудови меж енергоефективності виконано класифікацію регіонів за рівнем енергоефективності (табл. 2.3, рис. 2.7). Об'єкти які лежать на межі енергоефективності першого рівня утворюють клас об'єктів з найвищим рівнем енергоефективності. Кожна наступна сукупність F_j

енергоефективних об'єктів утворює клас з нижчим рівнем енергоефективності.

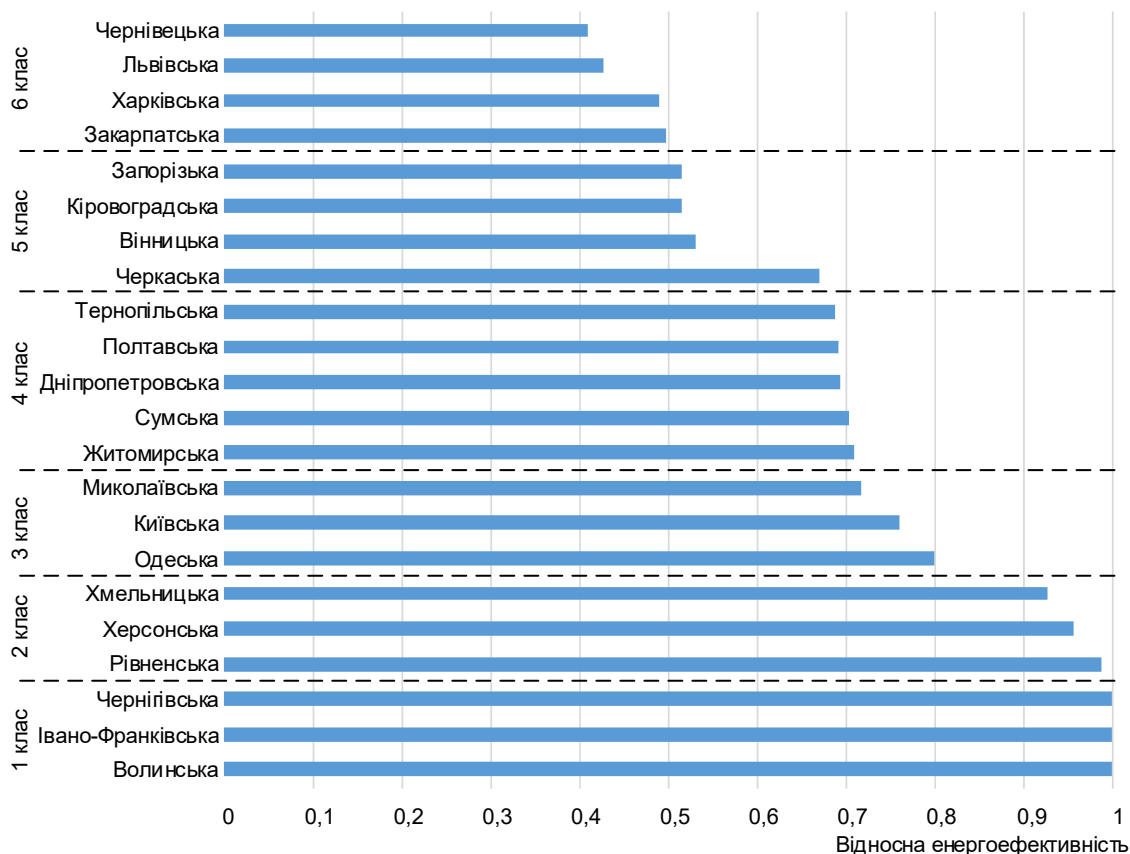


Рисунок 2.7 – Результати класифікації ВГ регіонів

Лідерами в галузі є ВГ Волинської, Івано-Франківської, Чернігівської областей. Показник енергоефективності об'єктів другого класу вищий 0,9, тому Рівненську, Херсонську та Хмельницьку області також можна вважати лідерами в галузі. Низький рівень енергоефективності мають ВГ, що утворюють 5 та 6 класи. Аутсайдерами є ВГ Закарпатської, Харківської, Львівської та Чернівецької областей.

Застосування алгоритму покрокової побудови меж енергоефективності дозволяє для об'єктів кожного класу нижчого рівня енергоефективності визначити еталонні регіони не лише з числа лідерів, а й з об'єктів, що входять до інших класів вищого рівня енергоефективності. Це дає змогу вибрати рівень об'єкту наслідування та отримати більш досяжні орієнтири для неенергоефективних об'єктів, оскільки не кожен з партнерів бенчмаркінгу відразу може досягнути рівня енергоефективності абсолютного лідера.

Таблиця 2.3 - Результат класифікації ВГ регіонів за рівнем енергоефективності та еталонні об'єкти

№ з/п	Об'єкт ВГ (область)	Кластер	Еталонні ВГ регіонів та коефіцієнти, з якими вони формують гіпотетичний об'єкт									
			1 кластеру		2 кластеру		3 кластеру		4 кластеру		5 кластеру	
			Ваговий коефіцієнт	Еталонний об'єкт (область)	Ваговий коефіцієнт	Еталонний об'єкт (область)	Ваговий коефіцієнт	Еталонний об'єкт (область)	Ваговий коефіцієнт	Еталонний об'єкт (область)	Ваговий коефіцієнт	Еталонний об'єкт (область)
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
1.	Волинська	1	1,000	Волинська								
2.	Івано-Франківська	1	1,000	Івано-Франківська								
3.	Чернігівська	1	1,000	Чернігівська								
4.	Рівненська	2	0,386 0,614	Волинська Івано-Франківська	1,000	Рівненська						
5.	Херсонська	2	1,000	Чернігівська	1,000	Херсонська						
6.	Хмельницька	2	0,742 0,258	Волинська Чернігівська	1,000	Хмельницька						
7.	Одеська	3	0,701 0,299	Волинська Чернігівська	0,018 0,982	Херсонська Хмельницька	1,000	Одеська				
8.	Київська	3	1,000	Чернігівська	0,619 0,381	Херсонська Хмельницька	1,000	Київська				
9.	Миколаївська	3	1,000	Чернігівська	0,485 0,515	Херсонська Хмельницька	1,000	Миколаївська				
10.	Житомирська	4	0,709 0,291	Волинська Івано-Франківська	0,632 0,368	Рівненська Хмельницька	1,000	Одеська	1,000	Житомирська		
11.	Сумська	4	1,000	Чернігівська	0,600 0,400	Херсонська Хмельницька	0,857 0,143	Київська Миколаївська	1,000	Сумська		
12.	Дніпропетровська	4	0,260 0,740	Волинська Чернігівська	0,240 0,760	Херсонська Хмельницька	0,511 0,489	Одеська Миколаївська	1,000	Дніпропетровська		
13.	Полтавська	4	0,715 0,285	Волинська Чернігівська	0,012 0,988	Херсонська Хмельницька	1,000	Одеська	1,000	Полтавська		
14.	Тернопільська	4	0,009 0,991	Волинська Чернігівська	0,393 0,607	Херсонська Хмельницька	0,190 0,810	Одеська Миколаївська	1,000	Тернопільська		

Продовження табл. 2.3

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
15.	Черкаська	5	1,000	Чернігівська	0,962 0,038	Херсонська Хмельницька	1,000	Київська	1,000	Сумська	1,000	Черкаська
16.	Вінницька	5	0,556 0,444	Волинська Чернігівська	0,086 0,914	Херсонська Хмельницька	0,849 0,151	Одеська Миколаївська	0,350 0,650	Дніпропетровська Полтавська	1,000	Вінницька
17.	Кіровоградська	5	0,026 0,974	Волинська Чернігівська	0,381 0,619	Херсонська Хмельницька	0,213 0,787	Одеська Хмельницька	0,069 0,931	Дніпропетровська Тернопільська	1,000	Кіровоградська
18.	Запорізька	5	0,111 0,889	Волинська Чернігівська	0,328 0,672	Херсонська Хмельницька	0,325 0,675	Одеська Миколаївська	0,409 0,591	Дніпропетровська Тернопільська	1,000	Запорізька
19.	Закарпатська	6	1,000	Чернігівська	0,553 0,447	Херсонська Хмельницька	0,513 0,487	Київська Миколаївська	0,768 0,232	Сумська Тернопільська	0,692 0,308	Кіровоградська Черкаська
20.	Харківська	6	0,456 0,544	Волинська Чернігівська	0,135 0,865	Херсонська Хмельницька	0,739 0,261	Одеська Миколаївська	0,570 0,430	Дніпропетровська Полтавська	0,768 0,232	Вінницька Запорізька
21.	Львівська	6	0,018 0,982	Волинська Чернігівська	0,387 0,613	Херсонська Хмельницька	0,201 0,799	Одеська Миколаївська	0,034 0,966	Дніпропетровська Тернопільська	0,990 0,01	Кіровоградська Черкаська
22.	Чернівецька	6	0,522 0,478	Волинська Чернігівська	0,102 0,898	Херсонська Хмельницька	0,812 0,188	Одеська Миколаївська	0,424 0,576	Дніпропетровська Полтавська	0,921 0,079	Вінницька Запорізька

2.4 Оцінювання рівня енергоефективності підприємств водопровідно-каналізаційного господарства (зовнішній бенчмаркінг)

2.4.1 Формування групи партнерів бенчмаркінгу

Вибір об'єкту-партнера визначається багатьма факторами. Партнери для бенчмаркінгу мають бути не лише кращими, але й мати показники придатні для порівняння з об'єктом дослідження. Одним із методів вибору партнерів бенчмаркінгу є триетапний підбір (процес STC) [229]: побіжний огляд (S - skim) - виконують загальний огляд джерел інформації, збирають додаткові дані; приведення в порядок (T - trim) – впорядковують наявні відомості; вибір кращих (C - cream) - вибір партнерів. Такий підхід має велику частку суб'єктивної думки дослідника. Інший підхід базується на класифікації об'єктів за рівнем енергоефективності.

Концепція пірамідального підходу до оцінки рівня енергоефективності STC з ієрархічною структурою передбачає, що енергоефективність вищих рівнів STC визначається енергоефективністю об'єктів нижчих рівнів. Тобто, якщо об'єкт вищого рівня має високий рівень енергоефективності, то можна вважати, що й об'єкти, які його утворюють, також мають високий рівень енергоефективності. Отже, типологізація за рівнем енергоефективності ВГ регіонів як об'єктів вищого ієрархічного рівня є основою для формування групи підприємств-партнерів бенчмаркінгу, які належать до регіонів відповідного класу. Крім того, залежно від вибору рівня об'єкту наслідування, до групи партнерів бенчмаркінгу можуть бути включені підприємства регіонів вищого рівня енергоефективності, або нижчого.

Оскільки подальші дослідження виконано для підприємств Волинської області, то формування партнерів бенчмаркінгу виконано з урахуванням класу області за рівнем енергоефективності. Спираючись на отримані результати класифікації регіонів партнерами бенчмаркінгу вважатимемо підприємства Волинської, Івано-Франківської, Чернігівської областей, що утворили перший клас за рівнем енергоефективності, а також підприємства Рівненської, Херсонської та Хмельницької областей, які мають високий показник енергоефективності та утворили другий клас за рівнем енергоефективності.

2.4.2 Рейтингування підприємств із застосуванням моделей енергоефективності методу аналізу середовища функціонування

Аналогічно, як і на етапі дослідження енергоефективності ВГ регіонів, для визначення відносної енергоефективності ВГ підприємств вибрано модель енергоефективності із змінним ефектом масштабу з орієнтацією на вхід. Як вхідні x_i показники енергоефективності вибрано: питоме електроспоживання, коефіцієнт втрат води та коефіцієнт технологічних витрат води, що визначаються на основі звітних даних про роботу підприємств ВГ, наведених в [91-97], як вихідний y_i показник - об'єм реалізації води. Результатом DEA-аналізу є ранжування підприємств за рівнем енергоефективності (табл. 2.4) і визначення гіпотетичних еталонів та завдань щодо покращення значень показників для неенергоефективних підприємств. Аналіз вхідних і вихідних показників (рис. 2.8) свідчить про істотні відмінності в їх структурі як для неенергоефективних об'єктів, так і енергоефективних. При цьому всі енергоефективні підприємства приймають значення енергоефективності рівне одиниці, і подальше їх ранжування є не можливим [219]. Для усунення цього недоліку застосовується модель кращої енергоефективності (суперенергоефективності) [230], яка будується на основі базової моделі VRS і дозволяє ранжувати енергоефективні об'єкти. Основною ідеєю підходу є те, що будується нова межа енергоефективності без input-комбінації енергоефективних об'єктів, відносно якої вимірюється енергоефективність. Математичне представлення моделі кращої енергоефективності із змінним масштабом подібне моделі VRS [219, 230], але підприємство, яке розглядається, виключається з набору підприємств:

$$\begin{aligned}
 \theta^{\sup} = f(\lambda X; Y) - \varepsilon \left(\sum_{j=1}^m s_j^- + \sum_{r=1}^k s_r^+ \right) &\xrightarrow{\lambda} \min; \\
 Y\lambda - s_r^+ &= y_i; \\
 X\lambda + s_j^- &= \theta^{\sup} x_i; \\
 \lambda, s_j^-, s_r^+ &\geq 0, \\
 \sum_{i=1}^n \lambda_i &= 1.
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

s^-, s^+ - резерви підвищення енергоефективності.

Таблиця 2.4 – Результат оцінки енергоефективності та еталонні підприємства (бенчмарки)

№ з/п	Підприємство	Показник рівня енергоефективності, θ	Ранг	Показник рівня кращої енергоефективності, θ^{sup}	Ранг	Еталонне підприємство та коефіцієнти, з якими вони формують гіпотетичний об'єкт			
						Ваговий коефіцієнт	Еталонне підприємство	Ваговий коефіцієнт	Еталонне підприємство
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
1.	КП "Чернігівводоканал"	1,000	1	1,12	1	1,000	КП "Чернігівводоканал"		
2.	КП "Луцькводоканал"	1,000	1	1,1	2	1,000	КП "Луцькводоканал"		
3.	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"	1,000	1	1	3	1,000	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"		
4.	Долинське ВУВКГ, м. Долина	0,923	4	0,923	4	1,000	КП "Чернігівводоканал"		
5.	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"	0,893	5	0,893	5	1,000	КП "Чернігівводоканал"		
6.	"Нововолинськводоканал"	0,854	6	0,854	6	0,517	КП "Луцькводоканал"	0,483	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"
7.	УВКГ м. Ковель	0,790	7	0,790	7	0,625	КП "Луцькводоканал"	0,375	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"
8.	УВКГ м. В.Волинський	0,763	8	0,763	8	0,800	КП "Луцькводоканал"	0,200	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"
9.	КП "Коломияводоканал"	0,751	9	0,751	9	0,915	КП "Луцькводоканал"	0,085	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"
10.	КП "Водотеплосервіс" м. Калуш	0,746	10	0,746	10	0,545	КП "Луцькводоканал"	0,455	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"

Продовження табл. 2.4

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
11.	КП "Дубноводоканал"	0,742	11	0,742	11	0,589	КП "Луцькводоканал"	0,411	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"
12.	КП "Ніжинське УВКГ"	0,721	12	0,721	12	0,849	КП "Луцьк водоканал"	0,151	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"
13.	КП "Прилуки-тепловодопостачання"	0,719	13	0,719	13	0,728	КП "Луцькводоканал"	0,272	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"
14.	КВУ "Каховський водоканал"	0,708	14	0,708	14	0,512	КП "Чернігівводоканал"	0,488	КП "Луцькводоканал"
15.	КП "Міський водоканал" м. Н.Каховка	0,689	15	0,689	15	0,640	КП "Луцькводоканал"	0,360	КП "Чернігів-водоканал"
16.	РОВКП ВКГ "Рівнеоблводоканал"	0,651	16	0,651	16	1,000	КП "Чернігівводоканал"		
17.	МКП "ВУВКГ м.Херсона"	0,591	17	0,591	17	1,000	КП "Чернігівводоканал"		
18.	КП "Міськтепловодоенергія" м. К.-Подільський	0,572	19	0,572	19	0,530	КП "Чернігівводоканал"		
19.	МКП "Хмельницькводоканал"	0,590	18	0,590	18	1,000	КП "Чернігівводоканал"	0,470	КП "Луцькводоканал"
20.	КП "Водоканал" м. Старокостантинів	0,557	20	0,557	20	1,000	КП "Чернігівводоканал"		

Згідно [230], енергоефективне підприємство може збільшити свій input-вектор і при цьому залишитися енергоефективним. Значення енергоефективності відображає радіальну відстань оцінюваного об'єкту до межі енергоефективності, яка визначається без цього підприємства. Отже, підприємства, спочатку визначені за допомогою DEA-аналізу як енергоефективні зі значенням відносної енергоефективності 1,0 (100% енергоефективні), матимуть значення більше, ніж 1,0 (Таблиця 2.4, рис. 2.8). Що стосується неенергоефективних підприємств, які знаходяться поза межею енергоефективності, то їх значення енергоефективності так і залишаються меншими одиниці. Метод кращої енергоефективності дозволяє ранжувати енергоефективні DMU так само, як ранжуються неенергоефективні об'єкти. Метод дає змогу визначити передові підприємства. Високе значення показника енергоефективності є предметом до подальшого дослідження [219]. Для об'єктів, у яких показник енергоефективності виявився меншим одиниці, встановлені цілі, які полягають у виведенні їх на межу енергоефективності.

2.4.3 Групування підприємств за рівнем енергоефективності та формування груп бенчмарків енергоефективності

Для формування груп підприємств, упорядкованих за рівнем енергоефективності з урахуванням подібності у структурі показників, виконано побудову кластів енергоефективності із застосуванням описаного алгоритму покрокової побудови меж енергоефективності, вкладених одна в одну. У результаті виконано класифікацію підприємств за рівнем енергоефективності (табл. 2.5, рис. 2.9) та визначено набори бенчмарків з числа енергоефективних підприємств різних за рівнем енергоефективності кластерів.

Групування партнерів бенчмаркінгу за їх схожістю щодо ефективності енергоспоживання забезпечує можливість формування груп однотипних об'єктів [81] та дозволяє сформувати еталон як збірний образ кращих практик об'єктів, що входять у групу з вищим рейтингом.

Таблиця 2.5 - Результат класифікації за рівнем енергоефективності та еталонні підприємства (бенчмарки)

№ з/п	Підприємство	Клас тер	Еталонне підприємство та коефіцієнти, з якими вони формують гіпотетичний об'єкт							
			1 кластеру		2 кластеру		3 кластеру		4 кластеру	
			Ваговий коефіцієнт	Еталонне підприємство	Ваговий коефіцієнт	Еталонне підприємство	Ваговий коефіцієнт	Еталонне підприємство	Ваговий коефіцієнт	Еталонне підприємство
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
1.	КП "Чернігів водоканал"	1	1,000	КП "Чернігівводоканал"						
2.	КП "Луцьк водоканал"	1	1,000	КП "Луцькводоканал"						
3.	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"	1	1,000	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"						
4.	Долинське ВУВКГ, м. Долина	2	1,000	КП "Чернігівводоканал"	1,000	Долинське ВУВКГ, м. Долина				
5.	"Нововолинськ водоканал"	2	0,517	КП "Луцькводоканал"	1,000	"Нововолинськ водоканал"				
			0,483	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"						
6.	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"	2	1,000	КП "Чернігівводоканал"	1,000	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"				
7.	УВКГ м. Ковель	2	0,915	КП "Луцькводоканал"	1,000	УВКГ м. Ковель				
			0,085	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"						
8.	УВКГ м.В.Волинський	3	0,800	КП "Луцьк водоканал"	0,314	"Нововолинськ водоканал"	1,000	УВКГ м.В.Волинський		
			0,200	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"	0,686	УВКГ м. Ковель				

Продовження табл. 2.5

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
9.	КП "Коломия водоканал"	3	0,512	КП "Чернігівводоканал"	0,34	"Нововолинськ водоканал"	1,000	КП "Коломия водоканал"		
			0,488	КП "Луцькводоканал"	0,66	УВКГ м. Ковель				
10.	КП "Водотеплосервіс" м. Калуш	3	0,545	КП "Луцькводоканал"	0,936	"Нововолинськ Водоканал"	1,000	КП "Водотеплосервіс" м. Калуш		
			0,455	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"	0,064	УВКГ м. Ковель				
11.	КП "Дубноводоканал"	3	0,625	КП "Луцькводоканал"	0,753	"Нововолинськ водоканал"	1,000	КП "Дубноводоканал"		
			0,375	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"	0,247	Долинське ВУВ-КГ, м. Долина				
12.	КП "Ніжинське УВКГ"	4	0,589	КП "Луцьк водоканал"	0,837	Долинське ВУВ-КГ, м. Долина	1,000	УВКГ м.В.Волинський	1,000	КП "Ніжинське УВКГ"
			0,411	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"	0,163	УВКГ м. Ковель				
13.	КП "Прилуки тепловодопостачання"	4	0,728	КП "Луцьк водоканал"	0,834	"Нововолинськ водоканал"	1,000	КП "Дубноводоканал"	1,000	КП "Прилуки тепловодопостачання"
			0,272	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"	0,166	УВКГ м. Ковель				
14.	КВУ "Каховський водоканал"	4	0,849	КП "Луцькводоканал"	0,183	"Нововолинськ водоканал"	0,834	УВКГ м.В.Волинський	1,000	КВУ "Каховський водоканал"
			0,151	КП "Івано-Франківськ водоекотехпром"	0,817	УВКГ м.Ковель	0,166	КП "Коломия водоканал"		

Продовження табл. 2.5

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
15.	КП "Міський водо-канал" м. Н.Каховка	4	0,640	КП "Луцькводо-канал"	0,500	"Нововолинськ водоканал"	0,420	КП "Дубноводо-канал"	1,000	КП "Міський водоканал" м. Н.Каховка
			0,360	КП "Чернігівводо-канал"	0,500	УВКГ м.Ковель	0,580	УВКГ м.В.Волинський		
16.	РОВКП ВКГ "Рівне-облводоканал"	4	1,000	КП "Чернігівводо-канал"	0,055	Долинське ВУВ-КГ, м. Долина	0,62	КП "Водотеплосервіс" м. Калуш	1,000	РОВКП ВКГ "Рівнеоблводоканал"
					0,945	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"	0,380	УВКГ м.В.Волинський		
17.	МКП "ВУВКГ м.Херсона"	5	1,000	КП "Чернігівводо-канал"	0,583	"Нововолинськ водоканал"	0,862	КП "Водотеплосервіс" м. Калуш	0,652	КВУ "Каховський водоканал"
					0,417	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"	0,138	КП "Дубноводо-канал"	0,348	КП "Прилуки тепловодопостачання"
18.	КП "Міськтепловодоенергія" м.К.-Подільський	5	1,000	КП "Чернігівводо-канал"	0,250	"Нововолинськ водоканал"	1,00	КП "Коломия водоканал"	0,344	КП "Прилуки тепловодопостачання"
					0,750	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"			0,656	РОВКП ВКГ "Рівнеоблводоканал"
19.	МКП "Хмельницькводоканал"	5	0,530	КП "Чернігівводо-канал"	0,995	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"	0,034	КП "Водотеплосервіс" м. Калуш	0,436	РОВКП ВКГ "Рівнеоблводоканал"
			0,470	КП "Луцькводо-канал"	0,005	"Нововолинськ водоканал"	0,966	КП "Дубноводо-канал"	0,564	КП "Ніжинське УВКГ"
20.	КП "Водоканал" м.Старокостантинів	5	1,000	КП "Чернігівводо-канал"	0,083	"Нововолинськ водоканал"	0,835	КП "Прилуки тепловодопостачання"	1,000	КВУ "Каховський водоканал"
					0,917	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"	0,165	КП "Коломия водоканал"		

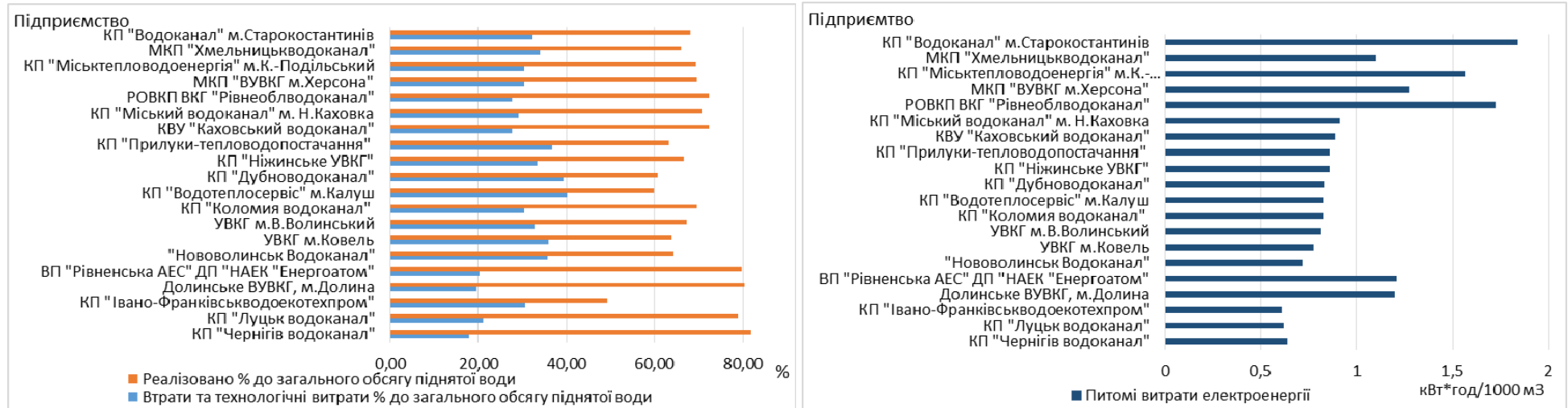


Рисунок 2.8 – Структура входних та вихідних змінних ВГ підприємств

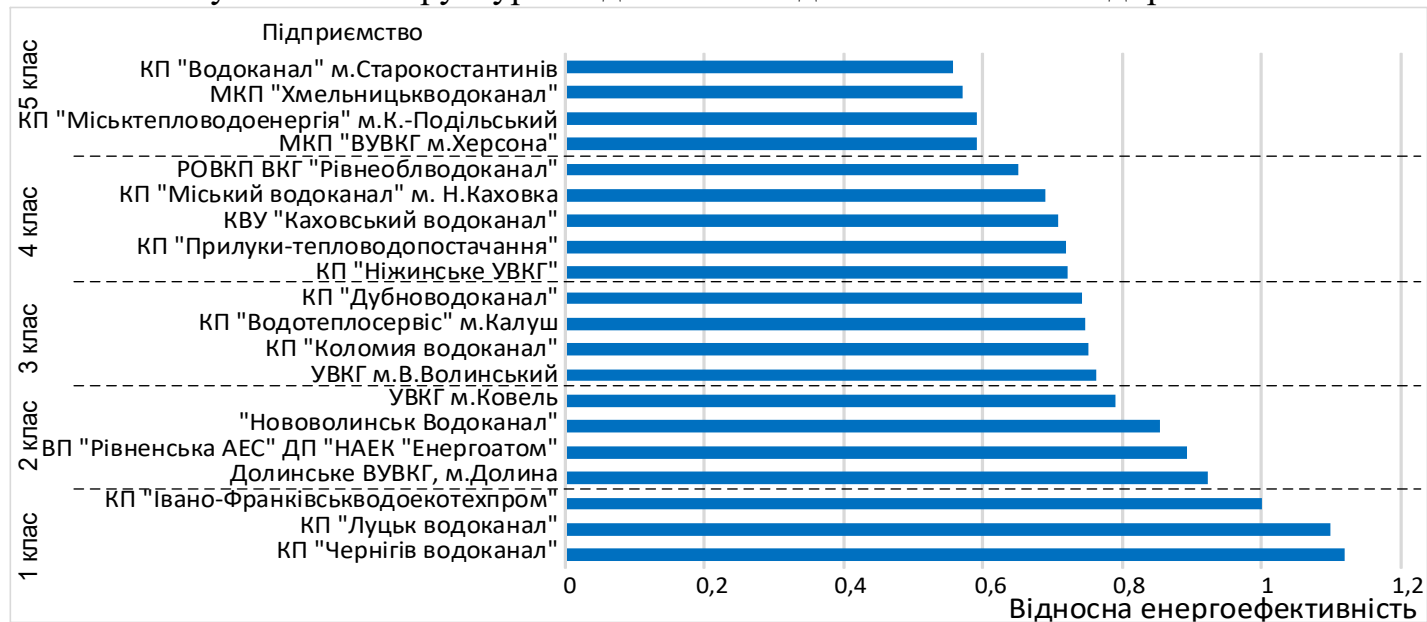


Рисунок 2.9 – Результати рейтингування та класифікації ВГ підприємств за показником відносної енергоефективності

2.4.4 Побудова штучних меж енергоефективності

Метод DEA дозволяє визначати відносну енергоефективність об'єктів. Однак, не лише неенергоефективні об'єкти, а й об'єкти, що знаходяться на межі енергоефективності, можуть поліпшити свою роботу. Для цього в роботах [231, 232] запропоновано формувати штучну межу ефективності на основі побудованих штучних об'єктів як теоретичний еталон для реальних об'єктів. Експерти вказують можливі діапазони зміни значень показників на основі їх значень для реальних ефективних об'єктів. Для формування штучних об'єктів використовуються значення показників, що належать цим діапазнам; кількість штучних об'єктів дорівнює кількості реальних ефективних об'єктів; будь-яких формальних вимог до якості сформованої штучної межі не висувається. У розвиток цієї ідеї в роботах [224, 227, 233] запропоновано формувати штучні межі ефективності на основі зовнішньої стосовно досліджуваних об'єктів інформації. Ідея запропонованого підходу полягає в наступному: виходячи з логіки і обмежень предметної області, можна задати діапазони можливих змін окремих входів і виходів, а потім, змінюючи значення входів і виходів в заданих діапазонах, сформувати множину штучних гіпотетичних об'єктів, не присутніх в реальній вибірці. Результатом формування штучних гіпотетичних об'єктів мають бути тільки Парето-оптимальні об'єкти, які будуть утворювати штучну межу ефективності для порівняння реальних об'єктів. Перевірка сформованої множини штучних гіпотетичних об'єктів на предмет Парето-оптимальності виконується з використанням моделей DEA [233]. Отже, сформувати штучну межу енергоефективності означає на основі отриманої від експертів інформації про можливі значення показників енергоефективності сформувати матриці входів X і виходів Y для сукупності об'єктів, які будуть штучними еталонними об'єктами. З урахуванням підходу, запропонованого в [224, 227, 233] процедура оцінки енергоефективності об'єктів на основі побудови штучної межі енергоефективності передбачає виконання таких етапів:

Крок 1. Визначення реально досяжних еталонів енергоефективності, сформованих з кращих значень вхідних $X^{e.real}$ та вихідних $Y^{e.real}$ показників сукупності n^{real} реальних об'єктів O^{real} :

$$x_i^{e.real} = \min_i x_{in}. \quad (2.12)$$

$$y_i^{e.real} = \max_i y_{in}, \quad (2.13)$$

Крок 2. За допомогою експертів та з урахуванням зовнішньої стосовно досліджуваних об'єктів інформації про можливі значення показників формування меж зміни показників: $[x^{e.min}; x^{e.max}]$, $[y^{e.min}; y^{e.max}]$.

Крок 3. Формування матриць еталонних об'єктів Y^e та X^e розміром $m \times n^e$ і $k \times n^e$, де n^e – кількість еталонних об'єктів, $n^e = n^{eph.real}$. При цьому, значення кожного вхідного та вихідного параметру повинні належати побудованому діапазону їх зміни $x_i^e \in [x^{e.min}; x^{e.max}]$, $y_i^e \in [y^{e.min}; y^{e.max}]$.

Крок 4. DEA-аналіз енергоефективності штучної сукупності об'єктів та формування штучної межі енергоефективності:

$$F_e = \begin{pmatrix} X^e \\ Y^e \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Крок 5. Якщо штучний еталон енергоефективності належить до числа Парето-ефективних еталонів ($X^e \in X^{eph.e}$, $Y^e \in Y^{eph.e}$) та кількість енергоефективних штучних об'єктів відповідає кількості реальних енергоефективних об'єктів ($n^e = n^{eph.real}$), то крок 6. Інакше, крок 3.

Крок 6. Формування об'єднаної сукупності $O_0 = \bigcup_{k=1}^{N^{real} + N^e} O_k$, яка містить реальні об'єкти дослідження O^{real} , та сформовані штучні Парето-ефективні еталони O^e .

Крок 7. DEA-аналіз енергоефективності отриманої сукупності O_0 .

Крок 8. Кінець.

Результатом процедури є формування сукупності штучних об'єктів, які відповідають умові Парето-оптимальності та формують штучну межу енергоефективності. Те, що об'єкт, який відповідає найкращим значенням показників (штучний еталон 1) належить до числа Парето-оптимальних, є умовою забезпечення досяжності встановлених еталонів. Сукупність F^e містить Парето-ефективні еталони O^e і є штучно утвореною межею енергоефективності нульового рівня, тобто, зовніш-

ньою оболонкою для вихідної сукупності O^{real} . Відносно сформованої штучної межі виконано оцінку енергоефективності підприємств ВКГ (таблиця 2.6) та встановлено бенчмарки для підвищення рівня енергоефективності не лише неенергоефективних підприємств, а й тих, які були визначені як енергоефективні.

Таблиця 2.6 - Результат оцінки рівня енергоефективності об'єктів та штучні бенчмарки

№ з/п	Підприємство	Показник рівня енергоефективності, θ	Еталони та коефіцієнти, з якими вони формують гіпотетичний об'єкт		Завдання для підвищення рівня енергоефективності	
			Ваговий коефіцієнт	Штучний еталон	Коефіцієнт витрат та витрат води	Питомі витрати електроенергії
1.	Штучний еталон 1	1	1	1	17,50	0,610
2.	Штучний еталон 2	1	1	2	18,00	0,62
3.	Штучний еталон 3	1	1	3	18,50	0,6
4.	КП "Чернігівводоканал"	0,984	1	1	17,71	0,615
5.	КП "Луцькводоканал"	0,972	1	3	20,53	0,60
6.	КП "Івано-Франківськводокотехпром"	0,968	1	3	29,67	0,59
7.	Долинське ВУВКГ, м.Долина	0,897	1	2	17,49	1,08
8.	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НА-ЕК "Енергоатом"	0,868	1	2	17,49	1,05
9.	"Нововолинськ Водоканал"	0,833	1	3	29,80	0,60
10.	УВКГ м.Ковель	0,769	1	3	27,69	0,60
11.	УВКГ м.В.Волинський	0,741	1	3	24,30	0,60
12.	КП "Коломия водоканал"	0,728	1	3	22,08	0,60
13.	КП "Водотеплосервіс" м.Калуш	0,727	1	3	29,23	0,60
14.	КП "Дубноводоканал"	0,723	1	3	28,41	0,60
15.	КВУ "Каховський водоканал"	0,699	1	3	23,34	0,60
16.	КП "Міський водоканал" м.Н.Каховка	0,698	1	3	25,67	0,60
17.	КП "Ніжинське УВКГ"	0,674	1	3	18,60	0,60
18.	КП "Прилуки тепловодопостачання"	0,659	1	3	19,13	0,60
19.	РОВКП ВКГ "Рівнеоблводоканал"	0,632	1	2	17,49	1,09
20.	МКП "ВУВКГ м.Херсона"	0,574	1	2	17,50	0,73
21.	КП "Міськтепловодоенергія" м.К.-Подільський	0,563	1	2	17,17	0,88
22.	МКП "Хмельницькводоканал"	0,544	1	3	18,52	0,60
23.	КП "Водоканал" м.Старокостантинів	0,542	1	2	17,51	1,00

Об'єднання процедур класифікації підприємств за рівнем енергоефективності та формування штучних меж енергоефективності забезпечило можливість позиціонування об'єктів в усіх кластерах (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 - Позиціонування підприємств в кластерах

№ з/п	Підприємство	Кластер	Показник рівня енергоефективності (з урахуванням гіпотетично ефективного об'єкту кластеру вищого рівня), θ	Ранг
1.	КП "Чернігівводоканал"	1	0,984	1
2.	КП "Луцькводоканал"	1	0,972	2
3.	КП "Івано-Франківськводокотехпром"	1	0,968	3
4.	Долинське ВУВКГ, м.Долина	2	0,923	1
5.	ВП "Рівненська АЕС" ДП "НАЕК "Енергоатом"	2	0,893	2
6.	"Нововолинськ Водоканал"	2	0,854	3
7.	УВКГ м.Ковель	2	0,790	4
8.	УВКГ м.В.Волинський	3	0,977	1
9.	КП "Коломия водоканал"	3	0,966	2
10.	КП "Водотеплосервіс" м.Калуш	3	0,956	3
11.	КП "Дубноводоканал"	3	0,888	4
12.	КВУ "Каховський водоканал"	4	0,727	1
13.	КП "Міський водоканал" м.Н.Каховка	4	0,956	2
14.	КП "Ніжинське УВКГ"	4	0,945	3
15.	КП "Прилуки тепловодопостачання"	4	0,937	4
16.	РОВКП ВКГ "Рівнеоблводоканал"	4	1,000	5
17.	МКП "ВУВКГ м.Херсона"	5	0,999	1
18.	КП "Міськтепловодоенергія" м.К.-Подільський	5	0,983	2
19.	МКП "Хмельницькводоканал"	5	0,943	3
20.	КП "Водоканал" м.Старокостантинів	5	0,943	4

Отримані результати, дали змогу виявити лідерів та аутсайдерів в групі, тобто визначити «кращих серед кращих», «гірших серед кращих», «кращих серед гірших» тощо. Таке позиціонування об'єктів в групах забезпечує можливість встановлення більш досяжних еталонів для прийняття рішення щодо першочергових заходів, спрямованих на підвищення ефективності енергоспоживання, оскільки не кожен з партнерів бенчмаркінгу відразу може досягнути рівня енергоефективності абсолютного лідера. Крім того з'являється можливість визначити середні значення показників енергоефективності в групі та виконати аналіз відмінностей

у ефективності енергоспоживання між групами [51, 81].

2.5 Оцінювання рівня енергоефективності структурних елементів системи комунального водопостачання (внутрішній бенчмаркінг)

Під структурними елементами СКВ маються на увазі водозабори. Зважаючи на невелику кількість водозаборів в межах підприємств ВГ (для підприємств обраного кластеру складає 3-5 одиниць), застосування граничних методів бенчмаркінгу є недоречним. Тому, для внутрішнього бенчмаркінгу структурних елементів СКВ доцільним є використання методів неграничного бенчмаркінгу. Вибір конкретного методу визначається постановкою задачі та метою дослідження і може бути здійсненим з урахуванням рекомендацій, наведених в табл. 2.1. Для порівняння об'єктів, що описуються великою кількістю показників, особливо за умови вибору вищого рівня об'єкту наслідування, зручно використовувати таксономічний показник [202], який є синтетичною величиною - «рівнодіючою» всіх ознак, що характеризують досліджувану властивість.

Об'єкти дослідження утворюють точки або вектори:

$$O_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, \dots, x_{iM}], \quad (2.15)$$

які розміщено в N -мірному просторі об'єктів, де кожна з властивостей, що описує об'єкт O_i , представлена у вигляді осі координат N -мірного простору об'єктів, а кожен об'єкт O_i є вектором простору з координатами, що визначаються (2.15).

Сукупність досліджуваних об'єктів, кожна властивість яких описано множиною показників енергоефективності, утворюють матрицю спостережень:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1M} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2M} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1N} & x_{2N} & \dots & x_{NM} \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

де x_{ij} - значення властивості i для об'єкту j .

Оцінювання рівня енергоефективності на основі таксономічного показника

[202] передбачає виконання низки етапів (рис. 2.10)

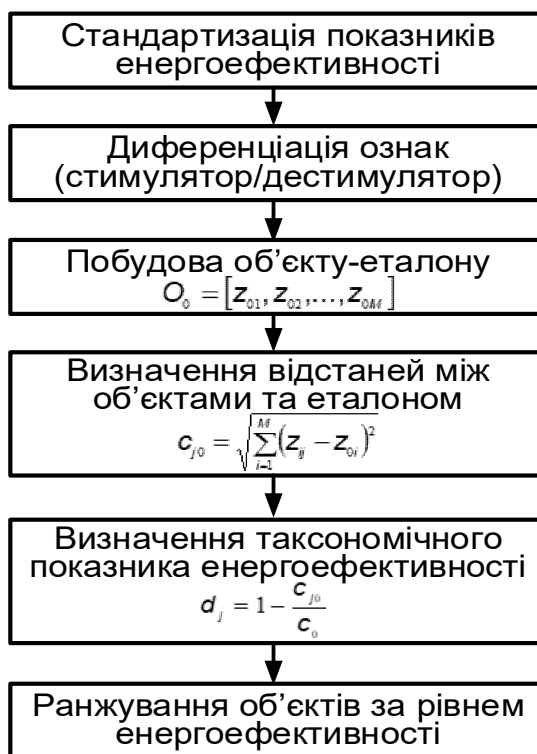


Рисунок 2.10 – Процедура ранжування за таксономічним показником

Дану процедуру було застосовано для ранжування водозаборів КП «Луцьк-водоканал». В якості вихідних показників енергоефективності вибрано [18, 31]: x_1 - питоме електроспоживання, x_2 – коефіцієнт втрат води, x_3 - коефіцієнт технологічних витрат води (Додаток Б), що визначаються на основі загальноприйнятих звітних даних про роботу ВГ [91-97], а також додаткові показники енергоефективності: x_4 - коефіцієнт ефективності використання виробничих потужностей водозабору, x_5 - коефіцієнт ефективності використання потужності електроприводу НА НС, x_6 - коефіцієнт ефективності використання продуктивності НА НС, x_7 - коефіцієнт узагальненого завантаження НА НС протягом доби (Додаток Б). Отримані результати (Додаток В) дозволили визначити кращий (водозабір «Дубнівський») та гірший (водозабір «Гнідава») об'єкти [18, 31]. Розширення набору показників забезпечує формування більш детального еталону енергоефективності, що сприяє виявленню слабких та сильних сторін об'єкту. Проте, причини низького рівня енергоефективності для гірших за рівнем енергоефективності об'єктів виявити складно. Для цього необхідним є аналіз вихідного стану об'єкту та ефективності його функціонування.

2.6 Експрес-оцінка рівня енергоефективності підприємства та його структурних елементів на основі багатокритеріальної класифікації

2.6.1 Задача оцінювання енергоефективності як задача багатокритеріальної порядкової класифікації та її математична постановка

Об'єкти СКВ описуються різними характеристиками, які можуть змінюватися залежно від ієрархічного рівня об'єктів та особливостей їх функціонування. Для якісного оцінювання рівня енергоефективності в [18, 36, 84] запропоновано виконати класифікацію можливих станів об'єктів водопостачання за окремими класифікаційними характеристиками енергоефективності. Основою підходу є використання методів порядкової багатокритеріальної класифікації [234-236], які передбачають використання інформації від експертів та скорочення розмірності простору класифікаційних ознак шляхом їх агрегування в невелику кількість складових критеріїв, які мають вербальну шкалу оцінок. Як метод такої класифікації вибрано метод ПАКС (Послідовне Агрегування Класифіковуваних Станів), що містить два етапи [235, 237]. На першому етапі здійснюється зниження розмірності ознакового простору шляхом побудови ієрархічної системи складових критеріїв, причому, складовий критерій кожного рівня визначає вибрану властивість, що агрегує вихідні характеристики. На другому – виконується розв'язок задачі класифікації станів об'єкту з використанням побудованих (агрегованих) критеріїв.

Нехай, G - властивість, що характеризує рівень ефективності енергоспоживання; $K = K_1, K_2, \dots, K_N$ - множина критеріїв (класифікаційних характеристик), за якими оцінюється стан об'єкту з точки зору вираженості властивості G ; $X_q = \{x_q^k\}$ для $q = 1, \dots, N$ - множина оцінок (шкала) за критерієм K_q , впорядкованих за зростанням властивості G ; $|X_q| = S_q$, S_q - кількість градацій (значень оцінок) на шкалі критерію K_q ; $Y = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N$ - декартовий добуток шкал критеріїв, що визначає множину всіх можливих описів об'єктів, тобто, простір станів об'єктів, що підлягають класифікації; $C = \{C_1, C_2, \dots, C_M\}$ - множина класів розв'язків, оцінених за багатьма критеріями та впорядкованих за вираженістю властивості G [236].

Кожен стан об'єкту описується набором оцінок за критеріями K_1, \dots, K_N та представляється у вигляді кортежу (векторної оцінки) [236, 237]:

$$y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jN}), \quad (2.17)$$

де $y_{jq} \in X_q$, $j = 1, \dots, S$ та загальна кількість комбінацій оцінок за N критеріями, що мають по S_q градацій на своїх шкалах, складає:

$$S = |Y| = \prod_{q=1}^N S_q. \quad (2.18)$$

Для зниження розмірності вихідного простору класифікаційних характеристик необхідно є побудова ієрархічної системи критеріїв, в якій різні комбінації вихідних характеристик агрегуються в менші набори нових ознак – складових критеріїв. Верхній рівень побудованої ієрархічної системи критеріїв визначається змістом задачі.

Множину векторних оцінок Y_i доцільно ототожнювати з класом C_i . Необхідно побудувати відображення множини допустимих станів об'єктів Y^a на множину класів C [235-237]:

$$F : Y^a \rightarrow C, \quad (2.19)$$

тобто, необхідно рознести всі можливі комбінації оцінок до заданих класів C_1, C_2, \dots, C_M , що задовольняють властивість непротириччя [235-237]:

$$y_i \in Y_i, y_j \in Y_j, (y_i, y_j) \in Q \Rightarrow (C_i, C_j) \in Q_C \Rightarrow i \leq j, \quad (2.20)$$

тобто, об'єкт з більш характерним для властивості G набором оцінок не може належати до класу, що відповідає меншому рівню вираженості властивості G [236].

В задачі порядкової багатокритеріальної класифікації процедура побудови шкали складових критеріїв складається з послідовних однотипних блоків [237]. Кожний блок класифікації i -го рівня складається з одного складового критерію та деякого набору його ознак. Градація оцінок шкали складового критерію є комбінацією оцінок вихідних ознак, які він агрегує. Як об'єкти класифікації виступають градації оцінок на шкалі ознак. Класами рішень i -го рівня виступають градації

оцінок на шкалі складового критерію. В блоці класифікації $(i+1)$ -го рівня складові критерії i -го рівня вважаються ознаками, множина градацій оцінок яких є новими об'єктами класифікації в скороченому ознаковому просторі, а класами рішень є градації оцінок на шкалі складового критерію $(i+1)$ -го рівня. Процедура повторюється, доки не залишиться складовий критерій верхнього рівня, шкала оцінок якого утворює впорядковані класи рішень C_1, \dots, C_M , де M - число класів [235]. Верхній рівень побудованої ієрархічної системи критеріїв визначається змістом задачі.

2.6.2 Оцінювання рівня енергоефективності на основі побудови градацій шкали оцінок правил класифікації

Зважаючи на багатогранність задачі оцінювання рівня енергоефективності об'єктів ВГ, необхідно визначитися, для якого рівня має проводитися оцінювання та з'ясувати перелік підзадач дослідження. Уточнення цих питань є основою формування базових характеристик енергоефективності та їх вербальних оцінок, а також їх обґрунтованого об'єднання в складові критерії та побудови ієрархічної системи класифікаційних критеріїв.

Нехай необхідно оцінити рівень енергоефективності за певними класифікаційними характеристиками, зміст яких відображає постановку задачі відповідно до (1.2) [18, 36, 84]. Відповідно до вибраної постановки задачі оцінювання, формується базовий набір класифікаційних характеристик енергоефективності, які мають вербальні оцінки. Кількість, склад, зміст критеріїв кожного рівня ієрархії процедури агрегування характеристик для здійснення послідовної класифікації можливих станів об'єктів; перелік базових характеристик, які будуть віднесені до певного складового критерію; змістовне наповнення критеріїв та шкал їх оцінок визначається з урахуванням досвіду експертів. Критерії повинні мати таку шкалу оцінок, які будуть відображати агреговані властивості об'єктів та будуть зрозумілими під час виконання класифікації.

Нехай рівень енергоефективності описується базовими критеріями K_1, \dots, K_n , що мають шкали X_i з двома або трьома вербальними оцінками 0,1,2, де 0 означає кращу оцінку, 1 – середню, 2 – гіршу. Необхідно розбити множину оцінок на п'ять

впорядкованих класів C_1, \dots, C_5 , де $C_1 > \dots > C_5$, $C_1 > \dots > C_5$, які будуть відповідати оцінці рівня енергоефективності об'єкту дослідження.

Відповідно до прийнятої експертами стратегії побудови ієрархічної системи критеріїв базові характеристики об'єднуються в складові критерії, що також мають вербальні порядкові шкали [18, 36, 84]. Критерії першого рівня EE_{k1}, \dots, EE_{km} , агрегують певні базові характеристики. Агреговані критерії першого рівня послідовно агрегуються у критерії другого рівня EE_1, \dots, EE_k . Верхній рівень складає критерій EE , який є результатом агрегування критеріїв другого рівня і характеризує рівень енергоефективності об'єкту водопостачання за приналежністю до певного класу енергоефективності C_i (C_1 - високий, C_2 - достатньо високий або добрий, C_3 - середній, C_4 - задовільний, C_5 - низький або незадовільний), визначеної на основі оцінки складового критерію верхнього рівня. Оцінювання рівня енергоефективності виконується за складовим критерієм верхнього рівня агрегування, а також за критеріями другого та першого рівнів агрегування, для яких отримують аналогічні градації шкали оцінювання. Такий підхід дає змогу не лише виконати якісну оцінку рівня енергоефективності, а й виявити причини недостатнього рівня енергоефективності та визначити шляхи для його підвищення, що полегшує прийняття рішення про першочерговість необхідних заходів.

Для побудови шкали оцінок складового критерію пропонується використовувати метод стратифікації кортежів, який є розширеним методом векторної стратифікації у випадку якісних оцінок. Даний метод є евристичним методом конструювання порядкової шкали для складового критерію, заснований на перетині багатовимірною ознакового простору паралельними гіперплощинами (стратифікація кортежів) [238]. Кожний шар (страта), що складається з однотипних комбінацій базових показників, представляє одну з оцінок складового критерію, а число таких перетинів (оцінок) визначається експертом. Кожний шар утворюється як комбінація кортежів оцінок шкали X_1 , сума яких фіксована. В роботах [18, 36, 84] було введено градацію шкали критеріїв – кращі, гірші та проміжні оцінки, причому, в результаті агрегування всі можливі комбінації кращих оцінок утворили одну кращу оцінку, гірших – одну гіршу, а решта – одну середню (рис. 2.11).

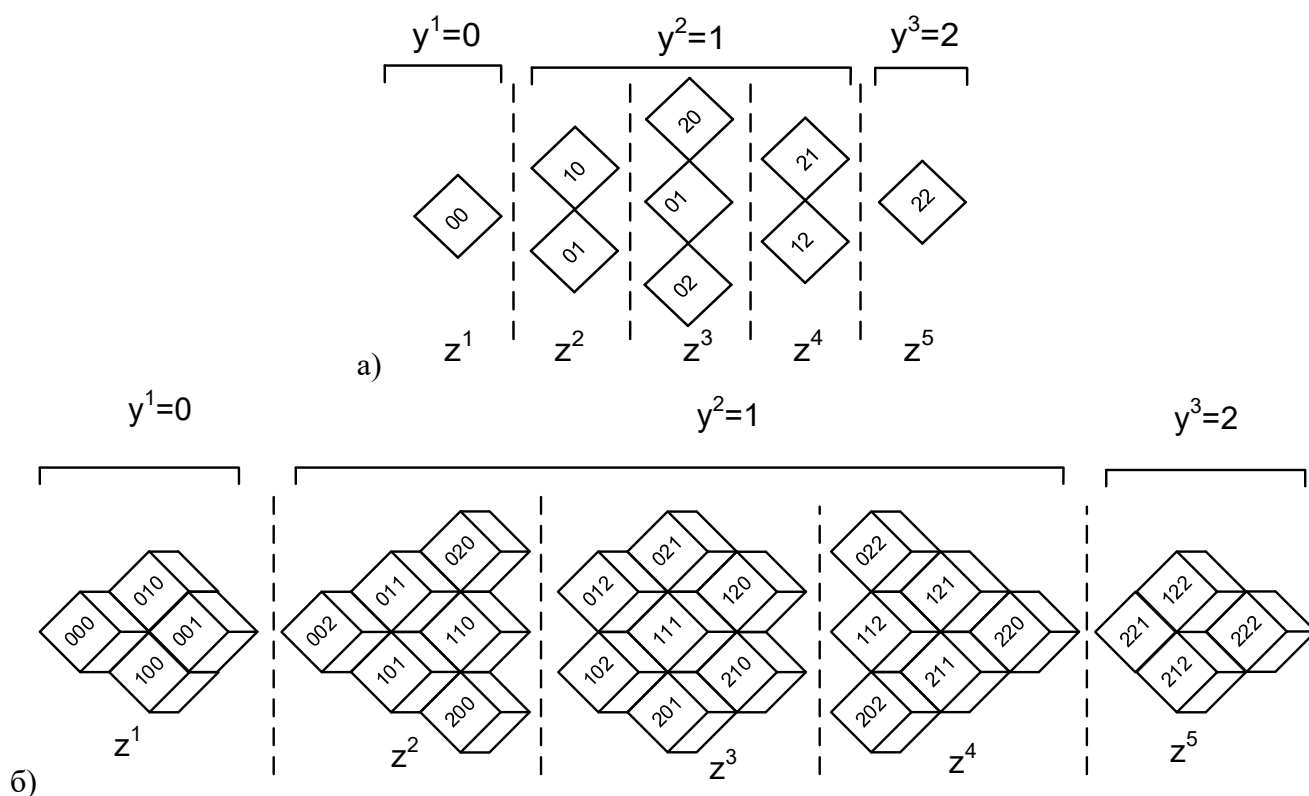


Рисунок 2.11 - Схеми формування градацій шкали складового критерію:

а) у випадку двох критеріїв нижчого рівня; б) у випадку трьох критеріїв нижчого рівня

Запропоновану процедуру експрес-оцінки рівня енергоефективності випробувано на прикладі КП «Луцькводоканал». Для даного підприємства, як і для багатьох інших підприємств ВГ України, характерними є проблеми зумовлені як вихідними умовами функціонування ВГ, так і особливостями організації режиму роботи об'єктів водопостачання.

Для якісного оцінювання рівня енергоефективності об'єктів підприємства вибрано постановку задачі, відповідно до (1.2), в такому формулювання: рівень ефективності електроспоживання EE визначається ефективністю вихідного стану $EE_{ст.}$ та організації технологічного процесу $EE_{орг.пр.}$ об'єкту дослідження. Для опису енергоефективності вихідного стану та організації технологічного процесу об'єкту водопостачання з урахуванням досвіду та рекомендацій експертів підприємства було введено набір базових характеристик енергоефективності та вербальний опис їх оцінок (детальний опис класифікаційних характеристик та їх оцінок наведено в [18, 84]), а також обрано стратегію об'єднання базових характеристик в складові критерії вищих рівнів (рис. 2.12).

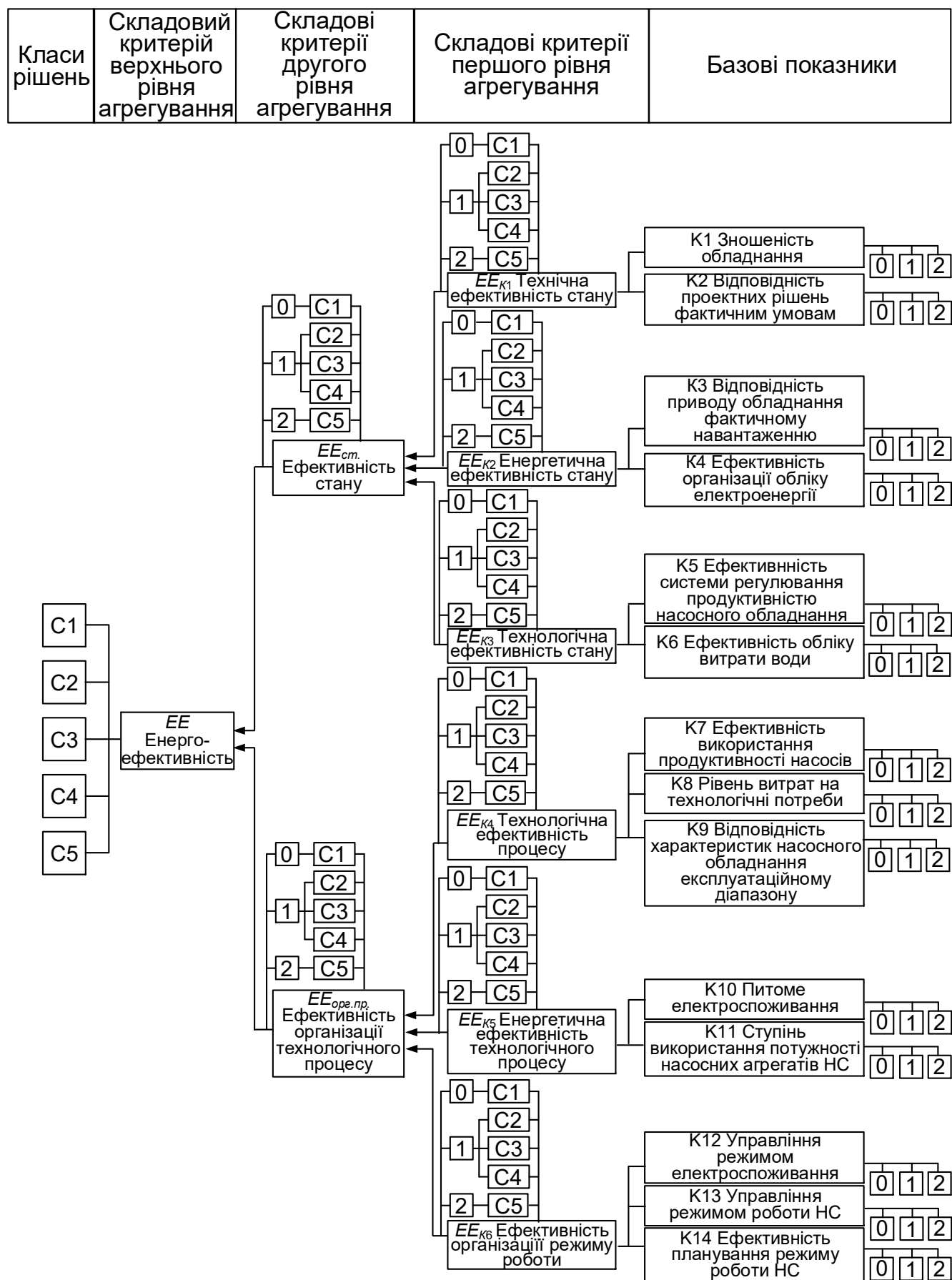


Рисунок 2.12 – Приклад ієрархічної системи агрегування базових характеристик в складові критерії

Для розв'язку задачі оцінювання рівня енергоефективності об'єктів СКВ КП «Луцькводоканал» було проведено анкетування провідних фахівців підприємства та отримано оцінки вихідних класифікаційних характеристик, які відображають вихідні умови функціонування та організацію режиму роботи. Оцінки базових характеристик за допомогою процедури послідовної класифікації було агреговано в оцінки критеріїв верхніх рівнів та визначено належність об'єкту дослідження до певних класів за рівнем енергоефективності, які мають якісну оцінку. Отримана якісна оцінка за критерієм верхнього рівня характеризує рівень енергоефективності об'єкту дослідження (табл. 2.8). Оцінки критеріїв нижчих рівнів характеризують рівень енергоефективності об'єкту по кожному із складових критеріїв. Аналіз цих оцінок сприяє виявленню проблем, які потребують першочергового вирішення для підвищення рівня енергоефективності.

Таблиця 2.8 – Приклад результатів застосування процедури експрес-оцінювання рівня енергоефективності водозаборів КП «Луцькводоканал»

Рівень агрегування	Складовий критерій ефективності	Оцінка критерію для водозаборів		
		Дубнівський	Омеляніківський	Гнідава
Перший	Технічна ефективність стану	Високий	Середній	Задовільний
	Енергетична ефективність стану	Добрий	Задовільний	Задовільний
	Технологічна ефективність стану	Високий	Низький	Низький
	Технологічна ефективність процесу	Добрий	Середній	Задовільний
	Енергетична ефективність технологічного процесу	Добрий	Задовільний	Низький
	Ефективність організації режиму роботи	Високий	Низький	Низький
Другий	Ефективність стану	Високий	Задовільний	Задовільний
	Ефективність організації технологічного процесу	Добрий	Задовільний	Низький
Верхній	Рівень енергоефективності	Добрий	Середній	Задовільний

Аналіз отриманих результатів (табл. 2.8) вказує, що найгірший стан справ є для водозабору «Гнідава» і серед питань, що потребують першочергового вирішення є вдосконалення організації технологічного процесу.

Отримані результати демонструють дієвість запропонованого способу експрес-оцінки рівня енергоефективності та виявлення шляхів самовдосконалення з метою підвищення рівня енергоефективності шляхом самоаналізу без залучення партнерів бенчмаркінгу.

2.7 Узагальнений алгоритм оцінювання рівня енергоефективності з урахуванням завдань бенчмаркінгу

Залежно від мети та завдань бенчмаркінгу, а також вибраного об'єкту наслідування (еталону) його механізм вимагає вирішення різних задач та передбачає можливість застосування різних методів та підходів.

Для попередньої оцінки об'єктом своїх позицій (без аналізу за множиною критеріїв, що впливають на ці позиції) може бути застосовано рекомендовану стандартом з бенчмаркінгу процедуру рейтингування на основі питомого електроспоживання. Результатом процедури є позиціонування об'єкту серед інших об'єктів в галузі. Для ідентифікації розриву залежно від позиції об'єкту дослідження як еталон може бути обрано: середнє значення питомого електроспоживання в галузі; краще значення питомого електроспоживання в галузі; кращі (середні) значення питомого енергоспоживання об'єктів ЄС. Проте її застосування не враховує завдання комплексної оцінки, не дає змоги встановити причини відставання, а також досяжні бенчмарки у випадку низького рівня енергоефективності об'єкту дослідження.

У випадку багатокритеріального аналізу алгоритм процедури оцінювання рівня енергоефективності представлено на рис. 2.13. Даний алгоритм містить рекомендації щодо вибору методу бенчмаркінгу з урахуванням об'єкту дослідження, мети та виду бенчмаркінгу, об'єкту наслідування, послідовність виконання етапів відповідних методів, а також результати, отримання яких забезпечить використання рекомендованих методів.

Як свідчать наведені приклади застосування складових запропонованої процедури спільне застосування різних підходів до оцінки рівня енергоефективності є інструментом пошуку шляхів удосконалення об'єкту водопостачання та його технологічного процесу для підвищення рівня енергоефективності.

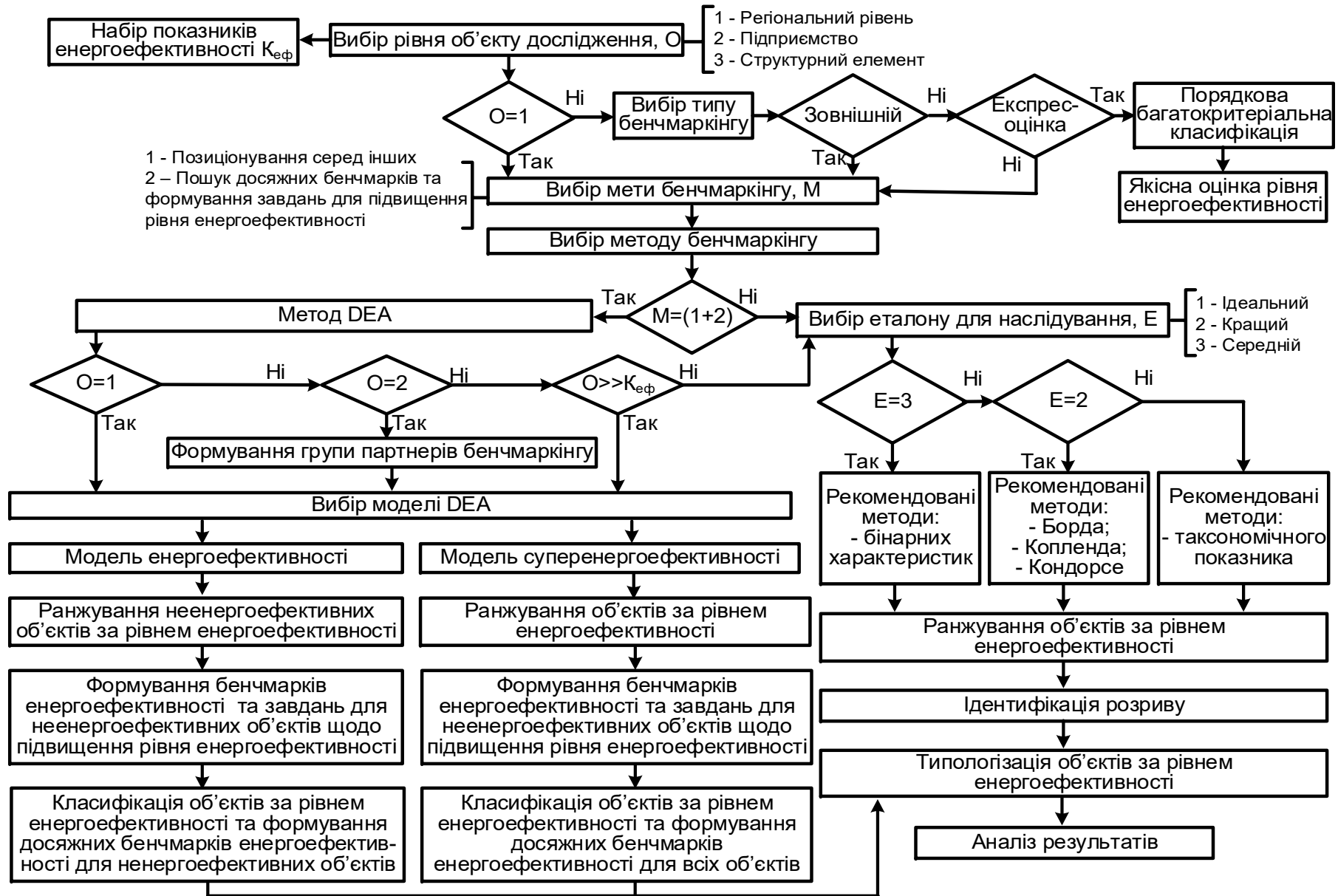


Рисунок 2.13 – Узагальнений алгоритм процедури оцінювання рівня енергоефективності з позицій бенчмаркінгу

2.7 Висновки до розділу

1. Бенчмаркінг енергоефективності як процедура планомірного вивчення кращих практик ефективності енергоспоживання у технологічній системі повинен проводитися на регулярній основі з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження та бути інтегрованим в СЕМ підприємства для забезпечення постійного та безперервного процесу вдосконалення системи.

2. Запропонований на основі систематизації існуючих методологічних аспектів порівняльного аналізу енергоефективності механізм бенчмаркінгу передбачає послідовне виконання низки процедур для реалізації основних етапів моделі методології бенчмаркінгу енергоефективності, рекомендованої міжнародним та державним стандартами, а його реалізація є основою виконання завдань бенчмаркінгу енергоефективності як складової СЕМ підприємства.

3. Для вирішення завдання підвищення рівня енергоефективності СТС та її об'єктів необхідним є багатокритеріальний (багатофакторний) аналіз з урахуванням різнопараметричних показників, що мають різний вплив на ефективність електроспоживання, який дає змогу виконати комплексну оцінку рівня енергоефективності СТС, що містить висновки щодо результатів і завдань з енергоефективності. Інструментом такої оцінки є рейтингова оцінка, яка потребує структурованого підходу до її визначення та застосування.

4. Розроблений на основі систематизованого аналізу суті найбільш широко застосовуваних методів рейтингового оцінювання та прикладів їх застосування узагальнений алгоритм механізму оцінювання рівня енергоефективності на засадах бенчмаркінгу містить рекомендації щодо використання відповідних методів рейтингування з урахуванням ієрархічного рівня вибраного об'єкту дослідження, мети та типу бенчмаркінгу, вибраного об'єкту наслідування та послідовність виконання їх етапів, що забезпечує реалізацію відповідних складових механізму бенчмаркінгу на етапі аналізу даних.

5. Запропонований підхід до кількісної оцінки рівня енергоефективності, що базується на спільному застосуванні моделей енергоефективності та кращої енер-

гоефективності методу аналізу середовища функціонування забезпечує ранжування як неенергоефективних, так і енергоефективних об'єктів, визначення лідерів і аутсайдерів, автоматичне формування бенчмарків енергоефективності та рекомендовані значення показників енергоефективності для неенергоефективних об'єктів для їх удосконалення. Покрокова побудова меж енергоефективності, в тому числі, штучних меж, побудованих з урахуванням сформованих на основі реально досяжних кращих значень показників енергоефективності штучних еталонів, забезпечує класифікацію об'єктів за рівнем енергоефективності та їх позиціонування в межах кожного класу, що дозволяє сформулювати більш досяжні бенчмарки для неенергоефективних об'єктів, а також визначити завдання щодо удосконалення енергоефективних об'єктів. Крім того класифікація об'єктів верхніх ієрархічних рівнів є основою для вирішення питання щодо вибору партнерів бенчмаркінгу для об'єктів нижчих ієрархічних рівнів.

6. У випадку невеликого числа об'єктів дослідження метод аналізу середовища функціонування втрачає свій сенс, оскільки всі об'єкти можуть бути визнані ефективними. Тому, для бенчмаркінгу структурних елементів системи комунального водопостачання (внутрішнього бенчмаркінгу) доцільним є використання методів неграничного бенчмаркінгу, вибір яких визначається постановкою задачі та метою дослідження. Для порівняння об'єктів за умови вибору «ідеального» еталону як об'єкту наслідування вищого рівня доцільним є застосування методу таксономічного показника, який дозволяє виконати позиціонування об'єктів, визначити кращі та гірші з них, ідентифікувати розрив між об'єктом і еталоном та на основі аналізу отриманих результатів визначити завдання щодо зміни показників для підвищення рівня енергоефективності.

7. Завдання типологізації об'єктів за рівнем енергоефективності дозволяє розглядати задачу оцінювання рівня енергоефективності як задачу багатокритеріальної класифікації за окремими класифікаційними ознаками енергоефективності, що мають вербальні оцінки. Використання методу порядкової багатокритеріальної класифікації, що базується на агрегуванні базових класифікаційних ознак в деякі складові критерії вищих рівнів та забезпечує формування ієрархічної систе-

ми класифікаційних критеріїв, дає змогу на основі побудованих градацій шкали оцінок критерію верхнього рівня виявити належність об'єкту до одного з впорядкованих класів за рівнем енергоефективності. Використання ієрархічної системи класифікаційних критеріїв дозволяє виконати класифікацію як за складовим критерієм верхнього рівня, так і за кожним із складових критеріїв нижчих рівнів. Це забезпечує можливість виявлення недоліків у побудові, організації та веденні технологічного процесу та дозволяє прийняти рішення про першочерговість відповідних заходів, спрямованих на підвищення рівня енергоефективності об'єкту дослідження. Перевагою такого підходу є можливість швидкої оцінки рівня енергоефективності та встановлення завдань щодо удосконалення об'єкту без залучення партнерів бенчмаркінгу, тобто, експрес-оцінки шляхом самоаналізу.

8. Спільне використання процедури кількісної оцінки та експрес-оцінки рівня енергоефективності забезпечує можливість оцінювання рівня енергоефективності, формування завдань щодо підвищення рівня енергоефективності та визначення можливих шляхів їх реалізації.

РОЗДІЛ 3

ПЛАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДРСТВА

3.1 Характеристика задачі планування енергоспоживання відповідно до вимог стандартів з енергоменеджменту

Одним із завдань етапу енергетичного планування є планування енергоспоживання, яке передбачає встановлення на основі енергетичного аналізу причинно-наслідкових зв'язків між енергетичним та іншими чинниками виробництва на рівні технологічної системи, об'єкту, процесу або обладнання, а його результатом є визначення БРЕ на певний період [144]. Згідно вимог стандартів серії ISO 50000 [105, 142, 144] БРЕ повинен бути унормованим до змінних, що впливають на енергоспоживання (враховувати зміни у визначальних змінних); часовий період його дії повинен бути типовим для коливань в технологічних операціях; дані щодо визначальних змінних та фактичного енергоспоживання повинні представляти той же часовий період, що й БРЕ. Згідно [142, 144] одним із способів представлення унормування БРЕ є побудова математичної моделі енергоспоживання об'єкту з урахуванням чинників, які суттєво впливають на величину витрати енергії.

Отже, планування енергоспоживання вимагає вирішення низки завдань: вибір об'єкту, на рівні якого передбачається встановлення БРЕ; формування набору визначальних змінних, що мають істотний вплив на енергоспоживання об'єкту; виявлення та формалізований опис циклічних змін технологічного процесу; встановлення часового проміжку дії БРЕ і збору даних про визначальні змінні та фактичне енергоспоживання; побудова математичних залежностей між енергоспоживанням та визначальними змінними – математичних моделей енергоспоживання, які б забезпечували коректне визначення БРЕ; визначення БРЕ для конкретного часового інтервалу з урахуванням планових значень визначальних змінних.

БРЕ, унормований до визначальних чинників, представляє собою деякий максимально реалістичний прогноз «нормативного» рівня енергоспоживання,

який необхідно і можливо досягти на даному об'єкті [139]. На його основі шляхом порівняння очікуваного (прогнозного) та фактичного значення енергоспоживання визначають рівень ефективності енергоспоживання, реально досягнутий на об'єкті дослідження, та аналіз його динаміки. Достовірність визначення БРЕ залежить від повноти врахування чинників, що суттєво впливають на енергоспоживання об'єкту дослідження, якості побудованої математичної моделі, її адекватності процесу енергоспоживання [170, 172]. Отже, під час планування енергоспоживання принципово важливим є вирішення питання, якою має бути математична модель, що використовується для встановлення БРЕ на кожному конкретному об'єкті, якими методами її будувати [147]. Слід зазначити, що енергоспоживання на будь-якому об'єкті залежить від різних чинників, які можуть впливати один на одного і мати нелінійний характер впливу на витрату енергії на об'єкті. Для кожного конкретного об'єкту склад таких чинників, їх вплив на енергоспоживання та тіснота зв'язку між ними є суттєво різними. Тобто, неможливо визначити деякий універсальний їх набір, який би дозволив будувати адекватні математичні моделі енергоспоживання для будь-яких об'єктів, навіть однотипних за призначенням [172]. Таким чином, формування набору визначальних чинників та вибір методу моделювання енергоспоживання повинен здійснюватися індивідуально для кожного об'єкту з урахуванням його особливостей функціонування.

3.2 Процедура формування базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання водопровідного господарства

Режим роботи об'єктів водопостачання визначається поточною величиною водорозбору (витратою води (ВВ) з мережі водопостачання), що в свою чергу, визначається водоспоживанням. Від режиму водоспоживання залежить ефективність режиму роботи НС і регулюючих вузлів, гідравлічні параметри розподільчої мережі водопостачання [196]. Тому, під час визначення ефективної витрати електроенергії об'єктів водопостачання, обов'язковим є урахування водоспоживання міста, яке є основою для планування подачі води в мережу водопостачання та ві-

діграє важливу роль в процесі управління ефективністю електроспоживання [46].

Значна кількість параметрів технологічного процесу водопостачання мають ймовірнісний характер, зумовлений тим, що водоспоживання формується під впливом різних чинників, багато з яких складно формалізувати [46]. Це зумовлює необхідність використання методів математичного моделювання на основі експериментальних даних про електроспоживання та визначальні змінні, що характеризують технологічний процес водопостачання. Сучасний розвиток інформаційного і технологічного оснащення підприємств та впровадження системи моніторингу режимів роботи об'єктів водопостачання забезпечує можливість створення баз даних (БД), що містять інформацію про параметри режиму роботи (енергетичні, гідравлічні та технологічні показники) і електроспоживання об'єктів водопостачання ВГ, та їх використання для формування БРЕ [19, 20, 46, 78] (рис. 3.1). При цьому, обов'язковим елементом є виявлення та урахування циклічних змін процесу водоподачі, зумовлених впливом зовнішніх чинників (сезонних, зумовлених впливом кліматичних чинників, зміною пори року, та соціальних, зумовлених зміною ритму життя населення у робочі та вихідні дні) [19, 20, 46, 78].

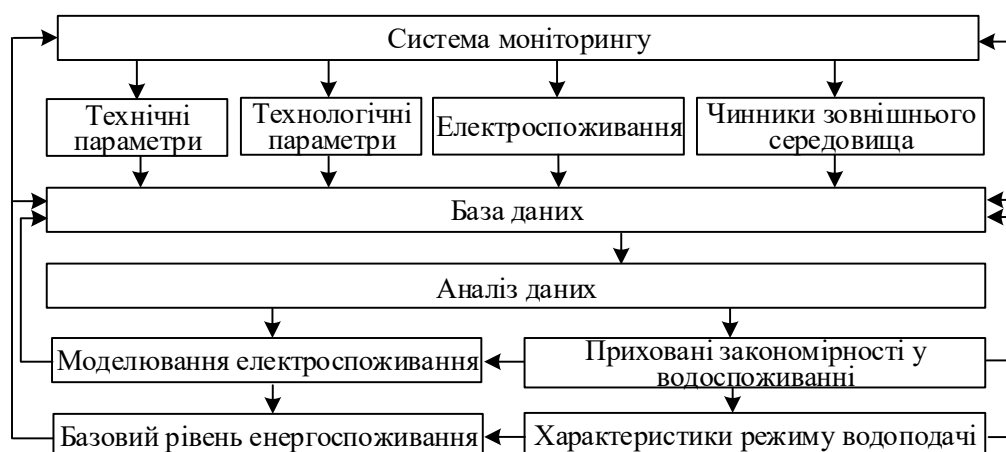


Рисунок 3.1 – Укрупнена структура процедури формування БРЕ

Зважаючи на значну кількість чинників, що впливають на ефективність електроспоживання об'єктів водопостачання ВГ, наявність взаємозв'язку між ними та складність математичних залежностей його фізичного опису, актуальним є використання для побудови моделей електроспоживання підходів, що базуються на використанні методів інтелектуального аналізу інформації [46, 199]. Їх викорис-

тання забезпечує можливість вивчення великих обсягів інформації та виявлення прихованих закономірностей, що визначають формування технологічних режимів об'єктів водопостачання, а шляхом обробки даних моніторингу режимів їх роботи можливе отримання нефізичних математичних моделей з невеликою кількістю вхідних змінних [44].

Першим етапом процедури визначення БРЕ (рис. 3.1) є виявлення тенденцій зміни процесу водопостачання залежно від сезону, кліматичних умов тощо [46] та їх формалізований опис. Водоспоживання є чинником, який безпосередньо визначає ВВ з мережі водопостачання, а отже й ефективність режиму водоподачі. Проте, враховуючи сучасний стан організації обліку водоспоживання у споживачів, отримання інформації про його зміну протягом доби на рівні СКВ та її структурних елементів є ускладненим. Тому, основним режимним показником процесу водопостачання слід вважати добовий графік витрати води (ГВВ), який за характером наближено відображає графік водоспоживання [19]. Створення БД добових ГВВ забезпечує можливість їх дослідження для виявлення закономірностей у формуванні добових ГВВ, пошуку їх подібності з урахуванням впливу зовнішніх чинників, що визначають процес водоспоживання [19, 44] та формування груп однотипних ГВВ. Це є основою формалізованого опису режиму водоподачі, а також визначення часових діапазонів для формування вибірок ретроспективних даних щодо електроспоживання та визначальних змінних і побудови моделі електроспоживання, адаптованої до циклічних змін процесу водоподачі [19, 46]. Процедуру моніторингу витрати води з мережі водопостачання, зокрема, виявлення циклічних змін технологічного процесу водопостачання, формалізований опис режиму водоподачі для типових умов роботи та прогнозування добової ВВ з мережі водопостачання детально розглянуто в розділі 4.

Процедура побудови математичної моделі електроспоживання передбачає формування множини визначальних змінних, вибірок вхідних та вихідних змінних з урахуванням типових умов роботи об'єкту водопостачання, структурно-параметричну ідентифікацію моделі (отримання моделі оптимальної складності) та перевірку її адекватності [20, 46].

Завершальним етапом процедури планування електроспоживання є визначення БРЕ на основі даних щодо вхідних змінних [46, 78]. Слід зазначити, що до переліку перелічених завдань планування електроспоживання додається задача планування технологічних параметрів процесу водоподачі, які входять до набору визначальних змінних. Реалізація попередніх етапів дозволяє отримати значення визначальних змінних для типових умов роботи об'єкту водопостачання, а також модель електроспоживання. Результатом процедури є визначення БРЕ, характерного для конкретного часового проміжку та запланованого режиму водоподачі.

Слід зазначити, що планування електроспоживання та визначення БРЕ є складовою процедури контролю ефективності електроспоживання, яка покликана надати енергоменеджеру необхідну інформацію для прийняття управлінських рішень. Отже, можна стверджувати, що процедура визначення БРЕ є складовою інформаційного забезпечення СЕМ. Тому, результати розрахункових процедур кожного етапу передаються в інформаційну БД, де вони разом з результатами спостереження параметрів технологічного процесу водоподачі та електроспоживання об'єктів водопостачання зберігаються та консоліднуються з метою подальшого використання в процедурі контролю енергоефективності, їх аналізу та уточнення.

3.3 Формування наборів і бази даних визначальних змінних базового рівня електроспоживання з урахуванням ієрархічного рівня об'єктів водопостачання

3.3.1 Аналіз факторного поля чинників, що мають вплив на електроспоживання об'єктів водопостачання

Для опису режиму електроспоживання об'єктів ВГ необхідно враховувати всю сукупність виробничих та технологічних чинників, що відображають умови їх роботи. Електроспоживання в СКВ залежить від низки технологічних чинників, які характеризують процес підйому та подачі води, підготування піднятої води тощо. Крім того, необхідно враховувати вплив на електроспоживання низки показників, які відображають досконалість технологічного процесу, ефективність організації режиму роботи структурних елементів СКВ.

До числа технологічних параметрів всього процесу водопостачання належать величини об'ємів піднятої та поданої в мережу води, тиску в трубопроводі, надлишкових напорів в диктуючих точках водопровідної мережі, втрати води в мережі водопостачання, ВВ на забезпечення технологічного процесу водоподачі тощо. Для водозабірних споруд такими чинниками є [239]: ВВ від кожної водозабірної споруди, тиск в напірному трубопроводі, перепад рівнів тиску на сітках, які обертаються, що визначає необхідність їх промивання. Технологічними параметрами, які слід враховувати на станціях підготування води, є: тиск у повітродувних та компресорних установках, ВВ на промивання, напір промивних насосів тощо. Для НС такими величинами є: об'єм води, що перекачується, тиск в напірному трубопроводі, тиск в НА, ВВ по кожному напірному водоводу.

Оскільки підсистема НС є найбільшим споживачем електроенергії, при цьому, основна її частка витрачається в насосних агрегатах, то необхідним є детальний аналіз чинників, що суттєво впливають на витрату електроенергії кожного НА та НС. В загальному випадку електроспоживання НС, на якій паралельно працює n НА, залежать від обсягу води, що перекачується НА, створюваного напору, ККД НА [240]. Подача НА визначає подачу НС. Напірні характеристики НА та спосіб їх регулювання визначають напірну характеристику НС, а ККД НА формують ККД НС. Для визначення ККД насосної установки, крім енергетичних характеристик насосів, двигунів і передач, необхідно знати характеристики трубопроводів і принципи включення (відключення) насосів [240, 241].

В сучасних умовах для забезпечення енергоефективного режиму водоподачі передбачається використання частотно-регульованих НА. Величина споживаної електроенергії НС водопостачання, що містить регульовані (РНА) та нерегульовані (ННА) насосні агрегати [242]:

$$W_{НС} = W_{ННА} + W_{РНА} \quad (3.1)$$

Електроспоживання ННА залежить від обсягу води, що перекачується, створюваного напору, ККД насосу і часу його роботи. Споживана електроенергія РНА в режимі мінімізації надлишкових тисків залежить від часу його роботи, від

обсягу води, що перекачується, створюваного напору і ККД залежного від обсягу води, що перекачується. При цьому необхідним є врахування миттєвих значень випадкової складової потоку водоспоживання, що припадає на РНА [242].

Для характеристики ефективності організації та ведення технологічного процесу водопостачання необхідним є урахування сукупності додаткових характеристик – показників енергоефективності, які характеризують технічний стан та енергетичну ефективність СКВ та її структурних елементів, відповідність проектних рішень фактичному водоспоживанню, ефективність організації технологічного процесу та регулювання водоподачі в умовах змінного водоспоживання, енергоефективність режиму роботи НС та режиму водоподачі [18]. Характеристики технологічного процесу водоподачі та його показники енергоефективності формують вихідне інформаційне поле [18, 30]. Їх опис наведено в Додатку Б.

Для вирішення задачі аналізу впливу окремих факторів, що характеризують технологічний процес водопостачання, на величину електроспоживання необхідним є вивчення характеру та ступеня причинно-наслідкових зв'язків між процесом електроспоживання та виділеними факторами. Завдання ускладнюється ще й необхідністю пошуку компромісу між введенням в математичну модель як можна більшої кількості факторів для забезпечення точності моделювання та зменшення кількості незалежних змінних через складність або неможливість отримання достатнього об'єму інформації. Таким чином, необхідно відібрати ті фактори, вклад яких в електроспоживання є значним, а сукупність їх спостережених значень буде представляти собою репрезентативну вибірку. Вибір таких факторів для об'єктів ВГ різних ієрархічних рівнів є окремою задачею.

3.3.2 Відбір інформативних визначальних змінних для об'єктів водопровідного господарства різних ієрархічних рівнів

Аналіз факторного поля чинників, що мають вплив на ефективність електроспоживання об'єктів водопостачання вказує на наявність великого масиву визначальних змінних, який необхідно враховувати під час моделювання електропоживання. Однак, одночасне урахування такої кількості змінних є складним на-

віть на рівні окремого структурного елементу ВГ нижчого рівня (наприклад, НС II-го підйому), і стає ще більш складним на рівні об'єктів вищих рівнів – водозаборів чи СКВ. Процедура моделювання електроспоживання передбачає впорядкування множини визначальних змінних і визначення необхідної та достатньої кількості інформативних визначальних змінних, які мають істотний вплив на електроспоживання, та відповідно до концепції пірамідального підходу потребує урахування ієрархічного рівня об'єкту дослідження.

Слід зазначити, що під час відбору змінних необхідно враховувати не лише істотність їх впливу на електроспоживання, а й складність їх вимірювання або обчислення. Крім того, зважаючи на призначення задачі моделювання, необхідно враховувати можливість подальшого контролю цих змінних з метою визначення причин недотримання запланованого БРЕ. Отже, вирішення задачі відбору інформативних визначальних змінних слід розглядати з позицій багатокритеріального вибору, що базується на принципах багатокритеріальної порядкової класифікації. Суть такого вибору, запропонованого та детально описаного в [18, 243], як складової формування впорядкованого інформаційного поля моніторингу енергоефективності наведено в шостому розділі. Спираючись на досвід експертів визначальні змінні факторного поля необхідно об'єднати в групи за відбірковими характеристиками, що мають вербальну порядкову шкалу з невеликим числом градацій.

Групі експертів було запропоновано на основі сформованих відбіркових характеристик оцінити кожен змінну вихідного факторного поля для формування сукупності інформативних змінних, що мають вплив на електроспоживання в об'єктів ВГ різних ієрархічних рівнів (для спрощення, до розгляду не приймався процес підготування води). Оцінювання кожним експертом здійснювалось на основі анкети (форму анкети з рекомендованим переліком змінних наведено в Додатку Г), яка містила перелік всіх можливих змінних факторного поля [18], що мають вплив на електроспоживання об'єктів ВГ. Експертам було дозволено не виконувати оцінювання змінних, які на їх думку не можуть використовуватися при заданій постановці задачі. Таким показникам автоматично виставлялось нуль балів і вони не внесені до утворених груп. Також було рекомендовано вносити нові

змінні, які на думку експертів мають вплив на електроспоживання, але не враховані в анкеті. Результатом обробки анкет є визначення середнього балу для кожної змінної з вихідного факторного поля, на основі якого і здійснюється віднесення змінної до однієї з страт за ступенем впливу на електроспоживання. Результати групування визначальних змінних для об'єктів різних ієрархічних рівнів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Приклад групування змінних за ступенем їх впливу на ефективність електроспоживання об'єктів ВГ різних ієрархічних рівнів

Страта	Зміст страти	Змінні, що мають вплив на рівень електроспоживання:	
		системи комунального водопостачання, водозабору	насосної станції другого підйому
П'ята	Показники, що одно-значно мають істотний вплив, їх обов'язково необхідно враховувати при побудові моделі	1. Об'єм піднятої води НС I-го підйому. 2. Об'єм води, поданої в мережу НС II-го підйому.	1. Об'єм води, поданої в мережу. 2. Тиск в водопровідній мережі. 3. Надлишковий тиск в диктуючих точках мережі.
Четверта	Показники, які мають значний вплив, їх варто враховувати при побудові моделі	1. Втрати води в мережі. 2. Коефіцієнт ефективності використання продуктивності НА НС.	1. Коефіцієнт корисної дії НС. 2. Нерівномірність витрати води з мережі водопостачання. 3. Коефіцієнт ефективності використання продуктивності НА НС.
Третя	Показники, які мають доволі значний вплив, їх можна враховувати при побудові моделі	1. Тиск в водопровідній мережі. 2. Витрати води на технологічні потреби.	1. Об'єм води, що перекачується кожним НА. 2. Тиск в напірному водоводі кожного НА. 3. Фактичний коефіцієнт ефективності використання потужності приводу НА НС.
Друга	Показники, які мають слабкий вплив, їх можна не враховувати при побудові моделі	1. Коефіцієнт ефективності використання потужності приводу НА НС. 2. ККД НС.	1. Кількість працюючих НА. 2. Усереднений час роботи НА. 3. Коефіцієнт узагальненого завантаження по продуктивності НА НС протягом доби.
Перша	Показники, що мають дуже слабкий вплив, їх варто не враховувати при побудові моделі	1. Об'єм очищеної води 2. Витрати води на комунально-побутові потреби	1. Номінальний ККД НА. 2. Номінальний коефіцієнт ефективності використання потужності приводу НА НС.

Наступним кроком є застосування методу експертних оцінок, який передбачає узагальнення оцінок експертів шляхом строгого ранжування - розташування змінних у порядку, що визначає рівень їх впливу на електроспоживання, а також перевірку узгодженості цих оцінок за допомогою коефіцієнта конкордації W , зна-

чущості коефіцієнта конкордації W за критерієм Пірсона, значущості відмінності вибраних чинників за t – критерієм Стьюдента [244].

Результати застосування методу експертних оцінок для відбору значимих змінних для СКВ показали таке [18]. Ранжування наведених в табл. 3.1 змінних, що впливають на ефективність електроспоживання СКВ, виявило нерівномірність та немонотонність їх впливу (Рис. 3.2).

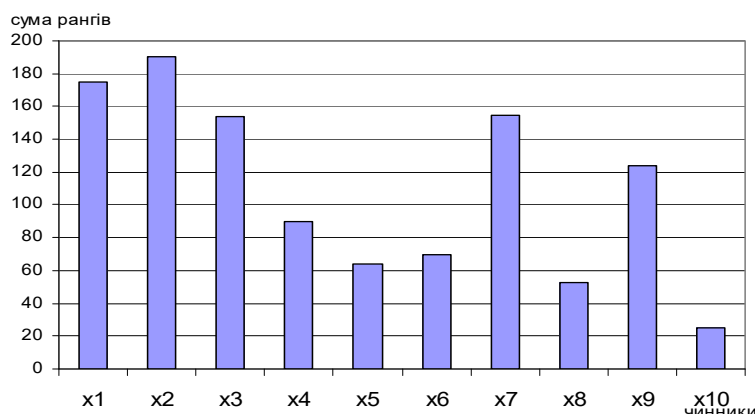


Рисунок 3.2 - Приклад ранжування змінних, що мають вплив на ефективність електроспоживання в СКВ:

x_1 - об'єм води, що перекачується НС I-го підйому; x_2 - об'єм води, що перекачується НС II-го підйому; x_3 - втрати води в мережі; x_4 - тиск в мережі; x_5 - коефіцієнт ефективності використання потужності приводу насосного обладнання НС; x_6 - об'єм очищеної води; x_7 - коефіцієнт ефективності використання продуктивності НА; x_8 - коефіцієнт корисної дії НС; x_9 - витрати води на технологічні потреби; x_{10} - витрати води на комунально-побутові потреби.

Перевірка узгодженості думок експертів за допомогою коефіцієнта конкордації W підтвердила високий рівень зв'язку між оцінками експертів ($W = 0,898$). Оцінка значущості коефіцієнта конкордації W за критерієм Пірсона доводить не випадкову узгодженість думок фахівців ($\chi_p^2 = 158,4 > \chi_{кр}^2 = 18,9$). В результаті було виділено такі змінні, що істотно впливають на ефективність електроспоживання в СКВ: об'єм води, що перекачується НС I-го підйому; об'єм води, що перекачується НС II-го підйому; коефіцієнт ефективності використання продуктивності НА НС; втрати води; витрати води на технологічні потреби. За t – критерієм Стьюдента було проведено перевірку значущості відмінності вибраних чинників та встановлено, що всі чинники належать до різних груп [18].

Відібрані методом експертних оцінок змінні належать до 1-3 страти (табл.

3.1), які містять змінні, що потребують урахування в математичній моделі електроспоживання. Таким чином, отримані результати підтвердили результати групування змінних на основі багатокритеріальної порядкової класифікації. При цьому, прийняття або неприйняття до розгляду певного чинника та формування наборів імовірно інформативних визначальних змінних є обґрунтованим. Набір визначальних змінних визначається ієрархічним рівнем об'єкту дослідження, для якого розглядається дана задача (система водопостачання, водозабір, насосна станція). На основі отриманих груп визначальних змінних, що характеризують ступінь їх впливу на електроспоживання, формується сукупність інформативних показників та здійснюється подальший її аналіз.

3.3.3 Формування бази ретроспективних даних визначальних змінних та електроспоживання

Передумовою процедури моделювання електроспоживання та визначення БРЕ є отримання інформації щодо електроспоживання (вихідної змінної) та відповідних визначальних змінних (вхідних змінних) об'єктів водопостачання та статистичний аналіз отриманих даних. Адекватність математичної моделі визначається накопиченою статистичною інформацією, тому важливим моментом під час побудови БРЕ є формування вихідної БД. Сформовані масиви значень вихідної та вхідних змінних визначатимуть похибку отриманого прогнозу – визначення БРЕ. БД рекомендується оцінювати декількома параметрами [245]:

- глибина вихідної інформації (передісторії) за часом $K_e = n \cdot \Delta T$, де ΔT - інтервал часу, для якого складається прогноз, n - кількість попередніх інтервалів;
- крок (період дискретизації) вихідної інформації Δt_i (місяць, тиждень, день, година), часто Δt_i збігається з необхідним кроком прогнозу Δt_n ;
- кількість вхідних змінних x_i , що використовуються для прогнозування вихідної величини. Вони повинні корелювати з вихідною змінною.

Згідно [142] для урахування циклічних змін технологічного процесу глибина передісторії повинна бути не менше одного року.

Зважаючи на сучасні вимоги до організації контролю ефективності електро-

споживання об'єктів ВГ, основою якого є визначення БРЕ, серед можливих періодів накопичення інформації [99] доцільними для використання є:

- для об'єктів ВГ вищих рівнів (галузь, підприємство, СКВ) та залежно від постановки задачі контролю можливо для структурних елементів (водозабір) - місячна вибірка, що відображає щомісячні значення електроспоживання, технологічних параметрів процесу водоподачі та показників виробничої діяльності;

- для структурних елементів об'єктів ВГ (водозабір, НС) - добова вибірка, що відображає зміни параметрів щодоби; найбільш зручна для обробки статистичної інформації; дозволяє врахувати циклічність процесу водопостачання. Збір даних вимагає наявності систем автоматизованого збору інформації.

Вимога стандартів серії ISO 50000 [105, 142, 144] щодо урахування циклічних змін технологічного процесу під час визначення БРЕ потребує вирішення низки задач, для чого необхідним є формування годинної вибірки, яка відображає зміну технологічних параметрів кожну годину протягом доби.

Формування БД включає в себе збір даних щомісячного, щодобового або щогодинного споживання електричної енергії НС, водозаборів та всієї СКВ за допомогою інтелектуальних приладів або систем обліку електроенергії (АСКОЕ) [20, 44]; технологічних параметрів всієї СКВ, водозаборів, НС та НА згідно даних АСУ ТП або журналу роботи НС (журналу машиніста [99]); фіксацію складу і кількості робочих НА та часу їх роботи; а також передбачає [242]: формування карти місяця, що містить інформацію про кількість робочих і вихідних днів для кожного місяця; формування архіву середньодобових температур; формування архівів електро- і водоспоживання робочих і вихідних днів кожного місяця тощо. Отже, до складу БД входить статистика ретроспективних виробничих показників, фактично відпрацьованих за попередній період, що дозволяють врахувати дійсну зміну обсягів виробництва, характеристики технологічного процесу, фактичні витрати електроенергії. Результатом формування БД є формування вибірок ретроспективних даних для вихідної та вхідних змінних з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження та циклічних змін процесу водоподачі.

3.3.4 Коригування наборів визначальних змінних з урахуванням періоду дискретизації для збору даних та результатів статистичного аналізу

Серед параметрів, що значною мірою впливають на ефективність електроспоживання об'єктів водопостачання є керовані параметри, які можуть бути легко змінені в процесі удосконалення технологічного процесу, і малокеровані параметри, зміна яких неможлива, або ж ускладнена з технічних причин [143]. Керовані параметри внаслідок забезпечення ефективного з точки зору витрат електроенергії режиму роботи технологічного обладнання, будуть зведені до оптимальних значень. Варіація цих параметрів знизиться, їх дисперсія зменшиться, що призведе до зниження дисперсії в рівні енергоспоживання, обумовленої впливом цих параметрів [143]. Отже, враховувати в моделі електроспоживання для визначення БРЕ параметрів з низьким рівнем варіації недоцільно [143]. Такий підхід дозволяє зменшити кількість визначальних змінних БРЕ в математичній моделі.

Вибрані відповідно до вимог побудови СЕМ та організації контролю ефективності електроспоживання періоди дискретизації зумовлюють усереднення низки параметрів процесу водоподачі та їх незмінність протягом вибраного періоду (наприклад, тиск в водопровідній мережі [99]). Інші параметри в припущенні забезпечення організації ефективного режиму водоподачі набувають своїх оптимальних значень і також є мало змінними (наприклад, ККД НС [241, 246]). Це є приводом для виключення їх з розгляду для спрощення моделі електроспоживання.

Важливим моментом у процедурі контролю ефективності електроспоживання є використання параметрів, вимірювання яких можливе з необхідною точністю і не є особливо складним [143]. Окремі визначальні змінні мають істотний вплив на електроспоживання, проте процедура їх визначення та контролю є складною. Разом з тим існують інші взаємопов'язані технологічні параметри, які легко вимірюються та контролюються. Наприклад, згідно [241] ККД НА:

$$\eta_{НА} = \eta_{нас} \cdot \eta_n \cdot \eta_{ов} \cdot \frac{H_{необх}}{H_{нас}}. \quad (3.2)$$

Тобто, енергія, що витрачається на створення надлишкових напорів

$\Delta H = H_{\text{необх}} - H_{\text{нас}}$ не розглядається як корисна [241].

Отже, для НС, НА якої відповідно до режиму водоподачі працюють у оптимальному експлуатаційному діапазоні, можна стверджувати [20]:

$$K_{\text{еф}}^{\text{НС}} = F(\Delta H_{\Sigma}), \quad (3.3)$$

де ΔH_{Σ} – сумарний надлишковий напір, створений НС протягом доби.

Також складним є завдання врахування миттєвих значень випадкової складової потоку водоспоживання, що припадає на РНА [242]. РНА забезпечує покриття миттєвих відхилень об'ємів ВВ, що зумовлені нерівномірністю та випадковим характером водоспоживання, від значень згідно запланованого режиму водоподачі [242]. Отже, можна припустити, що електроспоживання об'єкту водопостачання залежить від нерівномірності ВВ. Використання характеристик нерівномірності добового ГВВ (зокрема, морфометричних параметрів) [247] дозволяє спростити задачу врахування випадкового характеру водоспоживання. Прийнятність запропонованого підходу підтверджено результатами моделювання [20, 50, 56], аналіз яких свідчить про достатньо високу якість отриманих моделей та точність прогнозу, а також результатами застосування отриманих моделей для визначення БРЕ та контролю ефективності електроспоживання [58]. Крім того, це забезпечує можливість врахування та контролю відповідності запланованого процесу водоподачі фактичній ВВ з мережі водопостачання протягом доби.

Аналіз добових ГВВ дозволяє стверджувати, що протягом нічних годин ВВ є фактично незмінною. Протягом денних має місце значна її нерівномірність. Аналіз організації режимів водоподачі свідчить, що протягом нічних годин водоподача здійснюється за допомогою ННА. РНА включаються в роботу, зазвичай, протягом денних годин. Отже, урахування миттєвих значень випадкової складової потоку водоспоживання, що припадає на РНА, необхідне лише протягом денного періоду. Згідно результатів аналізу вкладу годинних витрат води з мережі водопостачання у конфігурацію добового графіка (табл. 4.2) нічний ВВ відповідає період з 1-ї по 6-у години доби. Отже, проміжок добового ГВВ з 7-ї по 24-у години можна вважати денним періодом, протягом якого працюють РНА.

Розвиваючи ідею спрощення врахування випадкового характеру водоспоживання як визначальні змінні БРЕ необхідно враховувати морфометричні параметри частини добового ГВВ, обмеженої проміжком денних годин. Крім цього, добова ВВ з мережі водопостачання повинна бути охарактеризована її складовими. Також коефіцієнт ефективності використання продуктивності НА, що враховує нераціональні витрати електроенергії за рахунок регулювання водоподачі засувками або байпасуванням повинен враховувати період роботи лише ННА (обчислюватись з урахуванням нічної складової ВВ з мережі водопостачання)

Для прийняття рішення щодо формування набору інформативних змінних для побудови математичної моделі електроспоживання важливим є аналіз зв'язків між вихідною та вхідними змінними. Для оцінки взаємозв'язку зручним є використання кореляційного аналізу із застосуванням вибіркового коефіцієнту парної кореляції, який є математичною мірою зв'язку між двома факторами:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^n (x_{il} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jl} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{l=1}^n (x_{il} - \bar{x}_i)^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=1}^n (x_{jl} - \bar{x}_j)^2}}; \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, m, \quad (3.4)$$

де x_i, x_j – значення ознак;

\bar{x}_i, \bar{x}_j – їх середнє значення.

Значення коефіцієнтів кореляції лежать в межах $-1 < r_{i,j} < +1$ і характеризують залежність між змінними. Чим ближче величина коефіцієнта кореляції до $(+1)$ або до (-1) , тим більше міра залежності між змінними. Значення $r_{i,j}=0$ свідчить про відсутність статистичного зв'язку між змінними [248]. Якісну оцінку тісноти зв'язку між змінними забезпечує шкала Чеддока [202, 206]. Слід зазначити, що для формування набору визначальних змінних, що мають вплив на ефективність електроспоживання, необхідний логічний аналіз взаємозв'язків. При цьому необхідно враховувати, що наявність сильної кореляції між окремими визначальними змінними може зумовити виникнення проблем з якістю оцінок параметрів моделі. Врахування в моделі електроспоживання вхідних змінних, що мають незначний вплив, ускладнює процедуру моделювання, проте неврахування окремих таких

змінних може призвести до неможливості відслідковування причин, що зумовили неефективне електроспоживання.

Викладені міркування є основою корегування сформованих наборів визначальних змінних БРЕ для об'єктів ВГ різних ієрархічних рівнів. Перелік змінних щодо яких прийнято остаточне рішення про врахування в моделі електроспоживання з урахуванням вибраного періоду дискретизації наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Набір визначальних змінних БРЕ для об'єктів різних ієрархічних рівнів

Об'єкти водопровідного господарства	Система комунального водопостачання, водозабір	Насосна станція II-го підйому
Період дискретизації	Місяць	Доба
Визначальні змінні	1. Об'єм піднятої води НС I-го підйому ($Q_{підн}$). 2. Об'єм води, поданої в мережу НС II-го підйому ($Q_{под}$). 3. Втрати води в мережі ($Q_{втр}$). 4. Витрати води на технологічні потреби ($Q_{техн.випр}$).	1. Складові водоподачі в різні періоди доби (Q_1 - у нічний період доби, Q_2 - у денний період доби, Q_3 - у проміжний період доби). 2. Сумарний добовий надлишковий тиск в мережі ΔH_{Σ} . 3. Характеристики нерівномірності добового графіка витрати води з мережі водопостачання протягом денних годин ($M_{1д}$ - округлість; $M_{2д}$ - компактність; $M_{3д}$ - видовження; $M_{4д}$ - випуклість)

3.4 Унормування базового рівня електроспоживання об'єктів водопровідного господарства до визначальних чинників

3.4.1 Формальна постановка задачі

Задача моделювання полягає наступному: за результатами n спостережень отримано значення вихідної змінної (електроспоживання НС) y^j та низки вхідних параметрів (визначальних змінних БРЕ) $x_i^j: \{y^j, x_i^j\}, \{i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\}$; на підставі отриманих даних необхідно визначити аналітичну залежність $W = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, яка найкращим чином описує зв'язок між вхідними параметрами та вихідною змінною. Причому структура моделі $f(X)$ невідома.

Для забезпечення вимог стандартів серії ISO 50000 [105, 142, 144] щодо урахування циклічних змін технологічного процесу під час визначення БРЕ модель електроспоживання повинна бути адаптованою до збурюючих впливів, тобто враховувати зміни режиму водоподачі, зумовлені впливом зовнішніх чинників.

Отримані в розділі 4 результати моніторингу циклічних змін водоподачі та виявлені закономірності у добових ГВВ, дозволяють стверджувати: результатом виконання процедури моделювання є набір моделей електроспоживання, побудованих з урахуванням впливу сезонного та соціального чинників [44, 86]:

$$\begin{aligned} W_{Q_i, K_{\text{дн}}, j} &= a_0^{i,j} + a_1^{i,j} x_1 + a_2^{i,j} x_2 + \dots + a_n^{i,j} x_n, \\ Q_i &\in [Q_{\min i}, Q_{\max i}]; \quad i = 1, \dots, k; \quad j = 1, \dots, m \end{aligned} \quad (3.5)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – вхідні змінні, що впливають на електроспоживання;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коефіцієнти рівняння;

Q_{\min}, Q_{\max} – мінімальне та максимальне значення водоподачі;

i, j – номер кластеру відповідно за сезоном та типом дня;

k, m – кількість кластерів відповідно за сезоном та типом дня;

$K_{\text{дн}}$ – ознака характеру дня (робочий, вихідний).

Область використання кожної моделі обмежується 1) визначенням для сезону максимальним та мінімальним значенням об'єму поданої в мережу води та 2) режимом водоподачі для типових умов роботи об'єкту водопостачання. Необхідність урахування обох чинників, що обумовлюють циклічні зміни процесу водоподачі, чи одного визначається вибраним періодом дискретизації для об'єкту ВГ.

3.4.2 Вибір методу структурно-параметричної ідентифікації моделі електро-споживання

Складність математичного моделювання електроспоживання будь-якого об'єкту обумовлена необхідністю урахування багатьох чинників, що впливають на споживання електроенергії, інформація про які міститься в результатах спостереження. Для побудови математичної моделі слід визначити її структуру та оцінити параметри, тобто вирішити завдання структурно-параметричної ідентифікації

моделі за вибіркою експериментальних даних.

Для математичного моделювання електроспоживання використовуються різні методи: класичні статистичні методи, засновані на регресійному аналізі (в тому числі, найпростішому однофакторному) [147, 173-178, 245, 249, 250], методи штучного інтелекту (апарат штучних нейронних мереж (ШНМ) [42, 49, 251-255] та нейро-фазі мереж [256-259]), методи самоорганізації математичних моделей (метод групового урахування аргументів (МГУА) [50, 56, 170, 260]).

На вибір методу прогнозування, впливає низка чинників, зокрема, необхідна форма прогнозу; горизонт, період і інтервал прогнозування; доступність даних; необхідна точність прогнозу; поведінка прогнозованого процесу. Нині сформульовано низку вимог до сучасних комп'ютерних моделей прогнозування [261]: інтервальність - можливість обчислення прогнозованої величини для будь-якого часового «вікна» від будь-якої дати до кінця розрахункового періоду попередження; адаптивність - можливість певних змін для виконання вимог досягнення необхідної точності прогнозування; рекурсивність - можливість додаткового навчання системи в міру надходження нових фактичних даних для підвищення якості прогнозування; робастність - надійність результатів прогнозу, за рахунок застосування адекватних і оптимальних моделей, а також стійкість по відношенню до помилок у вихідних даних; стійкість - стійкість математичних прогностичних моделей по відношенню до помилок у вихідних даних або часткової відсутності деякої їх частини; інтерактивність - можливість роботи кінцевих користувачів в інтерактивному режимі для коректування інформації; повнота - можливість реалізації функцій, властивих об'єкту прогнозування і досягнення необхідної точності прогнозування; економічність - можливість мінімізації витрат в плані використання інформаційних ресурсів і засобів автоматизації.

Вибір методу для вирішення конкретної практичної задачі є окремим і досить непростим завданням. Аналіз особливостей методів, їх переваг та недоліків, огляд прикладів їх застосування дозволяє стверджувати: не існує універсального методу, який міг би з однаковим успіхом застосовуватися для різних типів об'єктів, задовольняв би всі вимоги і не мав недоліків [250]. Кожен підхід і кожен ме-

тод має свої переваги, недоліки, межі застосування. Будь-який об'єкт має унікальний характер електроспоживання і складні залежності між електроспоживанням і чинниками, що впливають на нього. У зв'язку з цим виникає завдання вибору методу, придатного для побудови математичної моделі електроспоживання об'єктів ВГ, що володіє задовільною якістю прогнозу.

Одним з методів побудови математичної моделі електроспоживання є регресійний аналіз [147, 173, 175-178, 245, 249, 250]. Під час його застосування значною проблемою є вирішення двоетапної задачі функціонально-структурної ідентифікації: 1) визначення виду функціональної залежності – загальної структури моделі (лінійна, нелінійна регресія, поліном); 2) визначення частинної структури моделі – переліку чинників, що будуть використані як параметри моделювання. Структура моделі, як правило, невідома. Побудова достатньо складних регресійних моделей, що включають велику кількість незалежних змінних, потребує наявності значних обсягів статистичних даних. Вибір виду функціональної залежності, передбачає якісний теоретичний аналіз взаємозв'язків в поєднанні з використанням статистичних прийомів. Факторні ознаки повинні бути некорельованими (умова відсутності мультиколінеарності), передбачається точне їх вимірювання, в їх вимірах не повинно бути автокореляції, вибірки ретроспективних даних повинні бути однорідними, результуюча ознака повинна мати постійну дисперсію.

Визначальні змінні БРЕ об'єктів ВГ є різновимірними, окремі з них є взаємкорельованими. Відкидання однієї з корельованих змінних знижує інформативність отриманої моделі з точки зору виявлення чинників, які потребують управлінських впливів для підвищення рівня ефективності електроспоживання. Тому, використання методів регресійного аналізу потребує спочатку встановлення прихованих взаємозв'язків, перетворення простору вхідних параметрів (наприклад, методом головних компонент [35]) та побудови багатofакторної регресійної моделі з урахуванням латентних змінних (на головних компонентах) [37]. При цьому, складність полягає у необхідності підтвердження значимості вихідної матриці парних кореляцій (коваріацій) та адекватності вибірки, інтерпретації головних компонент, вибору стратегії обертання факторного простору.

Побудова регресії передбачає незмінність в часі значень коефіцієнтів регресійних моделей. Проте, за умови орієнтації об'єкту дослідження на постійне удосконалення з'являється нова інформація, що вимагає корегування значень регресійних коефіцієнтів математичної моделі. Це є досить трудомісткою процедурою. Жорсткі вимоги до вихідної інформації є причиною неефективності отриманих оцінок коефіцієнтів регресії [249].

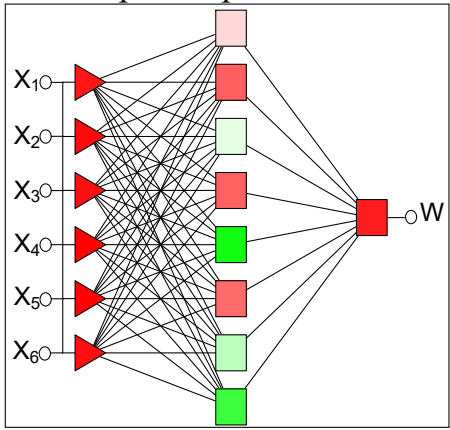
Альтернативою традиційним статистичним методам є математичний апарат штучного інтелекту, зокрема, штучні нейронні мережі [42, 49, 175, 251-255] і нейро-фазі мережі [256-259]. Головними чинниками популярності ШНМ стали їхні універсальні апроксимуючі і екстраполюючі властивості, що дозволяють моделювати довільні нелінійні залежності, та можливість навчання на основі наявної у великих БД інформації в умовах суттєвої структурної і параметричної невизначеності про характеристики модельованих процесів [256, 258]. ШНМ не вимагають наявності деякої додаткової інформації у вигляді знань експертів або інформації про вплив різних чинників на електроспоживання. Достатньо мати навчальні вибірки необхідного обсягу, а всі залежності між факторами вони виявляють автоматично у процесі навчання [256]. Такий підхід типу «black box», з одного боку, зручний (не потрібно мати багато апріорних знань), а з іншого боку, він не дає змоги інтерпретувати рішення, отримані за допомогою ШНМ [256]. Під час вирішення низки практичних задач, коли об'єм навчальної вибірки обмежений, на перший план виходить фактор швидкості навчання [262]. Процес навчання ШНМ є відносно повільним, і це не гарантує збіжність між фактичними і прогнозними даними. При цьому не всі нейронні мережі здатні подолати проблему так званого «перенавчання» (не здатність працювати на нових даних) [262].

Жорсткі обмеження на обсяг вихідної інформації зумовлюють необхідність використання спеціалізованих методів, орієнтованих на роботу в таких умовах. Тому, великий інтерес проявляється до механізмів самоорганізації математичних моделей. Самоорганізація, як метод адаптивного синтезу складних систем, заснована на припущенні, що інформація про взаємну кореляцію змінних прихована в експериментальних значеннях цих змінних [263]. Самоорганізацію моделей мож-

на визначити, як їх побудову при всебічному зменшенні необхідної апріорної інформації, зокрема, зводиться до мінімуму кількість вказівок автора моделювання [264]. З обчислювальної точки зору привабливим в цій ситуації є метод групового урахування аргументів (МГУА) [264-268] – потужний метод структурно-параметричної ідентифікації моделей та прогнозування в умовах невизначеності, один з найбільш ефективних методів інтелектуального аналізу даних, сучасна інформаційна технологія отримання знань з даних спостережень [269]. В його основу покладено принципи індуктивного моделювання складних систем: самоорганізації, зовнішнього доповнення і свободи вибору рішень під час автоматичної генерації та послідовної селекції дедалі складніших структур моделей [264-268]. МГУА не потребує представлення моделі в явному вигляді. Модель конструюється в процесі роботи алгоритму на основі обробки вибірок експериментальних даних. Для порівняння і вибору кращих моделей застосовуються зовнішні критерії [264], засновані на поділі вибірки на дві чи більше частин, причому оцінювання параметрів і перевірка якості моделей виконуються на різних підвибірках. Поділ вибірки дає змогу неявно (автоматично) врахувати різні види апріорної невизначеності при побудові моделі та є одним з найбільш успішних способів боротьби з перенавчанням [269]. МГУА є індуктивним методом прямої побудови лінійних, нелінійних, різницевих та інших математичних моделей складних процесів за короткими вибірками даних в умовах істотної неповноти та невизначеності інформації, пов'язаної як із властивостями обмежених вибірок даних, так і з зовнішніми умовами моделювання або апріорною інформацією. За допомогою МГУА можна синтезувати адаптивні моделі за умови дефіциту апріорної інформації. В [265, 266, 270] показано, що застосування МГУА дає найкращу оптимально спрощену модель для неточних, зашумлених або невеликих наборів даних.

Застосування згаданих методів для математичного моделювання процесу електроспоживання об'єктів водопостачання та аналіз результатів, отриманих в роботах [18, 20, 35, 37, 42, 49, 50, 52, 56], вказує як на позитивні, так і негативні сторони з точки зору їх придатності для вирішення задач планування та контролю ефективності електроспоживання (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 - Аналіз придатності результатів математичного моделювання електроспоживання в СКВ для вирішення задач планування та контролю електроспоживання

Метод математичного моделювання	Вид результату математичного моделювання	Похибка прогнозу, %	Пристосованість до вирішення задач планування та контролю електроспоживання	
			Позитивні сторони	Негативні сторони
Метод головних компонент	Математична модель виду [18, 37]: $\hat{W} = 875,284 + 9,393 f_1 + 43,979 f_2 + 21,406 f_3$ <p>де f_1, f_2, f_3 – головні компоненти, визначення на основі факторного аналізу латентних зв'язків між визначальними змінними x_i [35]</p>	3,23	Можливість виявлення впливу зміни головних компонент на ефективність електроспоживання та здійснення їх контролю	Значна похибка прогнозу, значення якої зростає із зростанням горизонту упередження; необхідність попереднього дослідження та інтерпретації латентних зв'язків між визначальними змінними; можливість контролю лише латентних змінних, ускладнена процедура контролю окремих змінних.
Нейронних мереж	Архітектура нейронної мережі [42], тип - багатошаровий перцептор.  БП 6-8-1 де $x_1 \div x_6$ – визначальні змінні	1,15	Достатньо мала похибка прогнозу; не потребує дослідження зв'язків між визначальними змінними; можливість прогнозу з великим інтервалом упередження (погодинного прогнозу на одну добу)	Не можливість виявлення впливу зміни визначальних змінних на ефективність електроспоживання; зростання похибки прогнозу у випадку малих вибірок даних, що погіршує прогнозуючу здатність НМ (наприклад, для літнього сезону).

МГУА, комбіна- торний алгоритм	<p>Математична модель виду [52]:</p> $W = 130,8 + 5,55 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1,17 \cdot x_2 \cdot x_3 + 1,51 \cdot x_4 \cdot x_6 - 0,724 \cdot x_5 + 3,94 \cdot x_1^2 + 0,57 \cdot x_2^2 \cdot x_3 + 2,22 \cdot x_1^2 \cdot x_5 + 0,45 \cdot x_4^2 \cdot x_6$ <p>де $x_1 \div x_6$ – визначальні змінні</p>	0,3	<p>Мала похибка прогнозу (навіть на вибірках малого об'єму);</p> <p>не потребує дослідження зв'язків між визначальними змінними;</p> <p>автоматична структурно-параметрична ідентифікація моделі;</p> <p>можливість виявлення впливу зміни визначальних змінних на ефективність електроспоживання; можливість контролю окремих змінних.</p>	<p>Складність багатofакторного прогнозу з великим інтервалом упередження (погодинного прогнозу на одну добу)</p>
-----------------------------------	--	-----	---	--

Об'єднання ідей МГУА та нейронних мереж зумовило створення МГУА-подібних нейронних мереж (МГУАНМ) [269], основою яких є ітераційні алгоритми МГУА. МГУАНМ належать до групи поліноміальних нейронних мереж (ПНМ) [271] з попарним комбінуванням виходів попереднього ряду або шару, причому число «прихованих шарів» може бути довільним.

На відміну від традиційних ШНМ з фіксованою архітектурою структура МГУАНМ може змінюватися в процесі навчання, а оцінка параметрів функцій активації здійснюється не одночасно для всіх нейронів мережі, а для кожного нейрона окремо [269]. Ефективність МГУАНМ полягає в швидкості процесу локального налаштування їх ваг і автоматичної оптимізації (самоорганізації) структури мережі (кількості вузлів і рядів або прихованих шарів) [268]. Використання різних поліномів як активаційних функцій дає такі переваги: простоту з погляду числової реалізації; високу швидкість навчання в умовах обмеженої навчальної вибірки та у випадках, коли дані на обробку подаються через довільні заздалегідь не відомі інтервали часу; архітектура нейронної мережі може бути ускладнена без необхідності перерахунку вже налаштованих синаптичних ваг [272]. Важливою особливістю МГУАНМ є їх спрямованість на ідентифікацію функціональної структури і параметрів моделі, прихованої в емпіричних даних, тоді як головною незручністю традиційних ШНМ є те, що виявлені залежності приховані в самій структурі НМ, тобто налаштована НМ використовується як обчислювальна структура, а не як явна модель [269]. МГУАНМ є ядром самоорганізуючої технології видобутку даних, яка здатна автоматично визначати змінні, структуру та параметри моделі.

Зазначені переваги МГУАНМ, а також приклади їх успішного застосування в різних галузях [273-276], в тому числі, в галузі енергетики [277-279], свідчать про доцільність використання МГУАНМ як надійного засобу побудови математичних моделей процесу електроспоживання об'єктів ВГ в умовах, коли структура моделі та механізм взаємодії спостережуваних параметрів є невідомими, а кількість результатів спостережень може бути обмеженою.

3.4.3 Математичне формулювання задачі моделювання електроспоживання об'єктів водопровідного господарства МГУА-подібними нейронними мережами

Математичний апарат МГУАНМ передбачає, що вихідними даними для структурно-параметричної ідентифікації моделі є обмежений обсяг спостережень. Нехай маємо вибірку даних, задану матрицею [280]:

$$P = (X : y), \dim X = n \times m, \dim y = n \times 1, x_i \in \mathbb{R}^m, i = \overline{1, m}, \quad (3.7)$$

де n - кількість спостережень (точок);

m - кількість аргументів (вектор-стовпців матриці X).

Передбачається, що істинне значення вихідного параметру (електроспоживання) \tilde{y} - деяка функція $\tilde{f}(\tilde{X}_M, \tilde{\Theta}_M)$ від істотних аргументів $\tilde{X}_M \subseteq X$ і вектора параметрів $\tilde{\Theta}_M$, $\dim \tilde{X}_M = n_w \times \tilde{M}$, $\dim \tilde{\Theta}_M = \tilde{M} \times 1$. Множина аргументів матриці X вибирається з умов конкретного завдання, але, крім справжніх аргументів, може містити і фіктивні. Елементи вектора y - результат накладання на істинне значення вихідного параметру \tilde{y} адитивного шуму ξ , який є випадковою величиною з нульовим математичним очікуванням і невідомою кінцевою дисперсією [280]:

$$y = \tilde{y} + \xi = \tilde{f}(\tilde{X}_M, \tilde{\Theta}_M) + \xi. \quad (3.8)$$

За даними вибірки спостережень необхідно побудувати функцію:

$$\hat{y}^* = f^*(X_{M^*}^*, \hat{\Theta}_{M^*}^*), \quad (3.9)$$

для якої критерій $CR^*(y, \hat{y}^*)$ приймає оптимальне значення. Оптимальному значенню критерію відповідає [280]:

$$\begin{aligned} \{f^*, X_{M^*}^*, \hat{\Theta}_{M^*}^*\} &= \arg \min_{f \in \Phi, X_M \in X, \hat{\Theta}_M \in \mathbb{R}^M, M \in [1, m]} CR(y, \hat{y}) = \\ &= \arg \min_{f \in \Phi, X_M \in X, \hat{\Theta}_M \in \mathbb{R}^M, M \in [1, m]} CR(y, f(X_M, \hat{\Theta}_M)), \end{aligned} \quad (3.10)$$

де Φ - множина функцій заданого класу, що генеруються алгоритмом МГУА;

X_M - деяка підматриця матриці X , $\dim X = n_w \times M$, $M \leq m$;

$\hat{\Theta}_M$ - вектор оцінок конкретної функції f , $\dim \Theta_M = M \times 1$;

\mathfrak{R}^M - M -мірний простір дійсних значень вектора параметрів Θ_M .

Структурно-параметрична ідентифікація моделі потребує вирішення [280]:

1) задачі оптимізації множини аргументів матриці X , перетворених в заданому класі функцій:

$$\{f^*, X_{M^*}^*, \hat{\Theta}_{M^*}^*\} = \arg \min_{f \in \Phi, X_M \in X, M \in [1, m]} CR(y, \hat{y}) = \arg \min_{f \in \Phi, X_M \in X, M \in [1, m]} CR(y, f(X_M, \hat{\Theta}_M)) \quad (3.11)$$

2) задачі оптимізації значень параметрів Θ_M функції f , що залежить від множини аргументів X_M :

$$\hat{\Theta}_M = \arg \min_{\Theta_M \in \mathfrak{R}^M} QR(y, \hat{y}) = \arg \min_{\Theta_M \in \mathfrak{R}^M} QR(y, f(X_M, \Theta_M)). \quad (3.12)$$

Структурою моделі є функція $f(X_M, \Theta_M)$, задана з точністю до значень параметрів Θ_M . Функція $f(X_M, \hat{\Theta}_M)$ є деяким розв'язком або моделлю, а функція $f^*(X_{M^*}^*, \hat{\Theta}_{M^*}^*)$ – оптимальним розв'язком задачі (оптимальною моделлю). QR - критерій якості вирішення задачі параметричної ідентифікації кожної окремої моделі, відповідно до якого визначаються оптимальні значення вектора параметрів $\hat{\Theta}_M$ для деякої структури моделі; CR - критерій для визначення оптимальної структури моделі (критерій якості моделі). Під побудовою моделі розуміється генерація її структури і оцінювання параметрів, які відповідають цій структурі. Відшукується краща структура $y = f(X)$, яка на отриманих за навчальними вибірками параметрами Θ_M найбільш точно з точки зору зовнішнього критерію представить всі об'єкти моделі (3.9). Шуканою моделлю електроспоживання об'єкту ВГ є математична залежність, представлена поліномом Колмогорова-Габбора [265, 266]:

$$y = \theta_0 + \sum_{i=1}^m \theta_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \theta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \theta_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (3.13)$$

Івахненко О.Г. показав, що ряди Колмогорова-Габбора можуть бути виражені як каскад або мережа поліномів другого порядку, використовуючи тільки пари змінних [266]. В процесі процедури навчання можна обрізати вітки, які не сприяють досягненню кращих результатів, що дозволяє розвивати лише доміную-

чі причинно-наслідкові зв'язки [269]. За допомогою алгоритму МГУА модель може бути представлена у вигляді набору нейронів, в якому різні їх пари в кожному шарі з'єднані через квадратичний поліном і формують нові нейрони в наступному шарі. Тобто, математичний опис (3.13) можна подати у вигляді системи часткових квадратичних поліномів лише від двох змінних (нейронів) [269]:

$$y = G(x_i, x_j) = \theta_0 + \theta_1 x_i + \theta_2 x_j + \theta_3 x_i x_j + \theta_4 x_i^2 + \theta_5 x_j^2 \quad (3.14)$$

Такі часткові квадратичні поліноми використовуються зворотно по всій мережі пов'язаних нейронів для формування універсальної кореляції вхідних і вихідних змінних. Кожен елемент МГУАНМ є нелінійним рівнянням між двома входами та одним виходом, а його коефіцієнти визначаються методами регресії. Непродуктивні елементи автоматично видаляються в процесі побудови мережі через неможливість вказати точний вихід та корисні з'єднання кожного прихованого шару. Повторюючи ці кроки, МГУАНМ забезпечує визначення правильних та близьких результатів з найменшою похибкою та високою прогнозованою силою. Ієрархія поліномів вибудовується з використанням квадратичної форми (3.14). Константи кожної квадратичної функції G_i для оптимального формування виходу протягом усього набору пар даних вихід-вхід визначаються за критерієм [269]:

$$E = f(y_i; G_i(\cdot, \cdot)) \rightarrow \min \quad (3.15)$$

де y_i - фактичні значення вихідної змінної (електроспоживання).

Алгоритм МГУАНМ створює модель, що представляє собою сукупність нейронів у різних шарах. Кожен нейрон у мережі застосовує передавальну функцію, що дозволяє комбінаторному пошуку вибрати таку передавальну функцію, що прогнозує дані найменшою похибкою. Ця НМ є самоорганізованою мережею, що складається з кількох шарів і кількох нейронів у кожному з шарів. Оскільки будь-який з нейронів мережі навчається незалежно від інших, багат шарова мережа, яка містить довільне число вузлів, може навчатися на основі малої вибірки.

$$\text{Вихідна вибірка } W = A \cup B \cup C, \quad A \cap B = \emptyset, \quad B \cap C = \emptyset, \quad A \cap C = \emptyset.$$

Для визначення параметрів моделі використовується внутрішній критерій, в якості якого найчастіше слугує відносна середньоквадратична похибка [265-268]:

$$\Delta^2(A) = f_1(y_i; \hat{y}_i) \rightarrow \min, \quad (3.16)$$

де \hat{y}_i - значення вихідної змінної, розраховані за моделлю за змінними x_m ;

N_A - кількість точок навчальної вибірки.

Оптимальність моделі визначається критеріями селекції моделі [265, 266]: критерієм регулярності $\Delta^2(B)$ (відносною середньоквадратичною похибкою, розрахованою на точках, не використаних для побудови моделі) та критерієм незміщеності (мінімуму зсуву) $n_{зм}^2$, який вимагає максимального збігу значень вихідної змінної двох моделей, отриманих на двох частинах вибірки даних) [265, 281]:

$$\Delta^2(B) = f_1(y_i; \hat{y}_i) \rightarrow \min, \quad (3.17)$$

$$n_{зм}^2 = f_2(\hat{y}_{Ai}; \hat{y}_{Bi}) \rightarrow \min, \quad (3.18)$$

де \hat{y}_A - значення вихідної змінної, розраховані за моделлю, отриманої на частині вибірки A ;

\hat{y}_B - значення вихідної змінної, розраховані за моделлю, отриманою на частині вибірки B ;

N_B - кількість точок перевірконої вибірки (приблизно 30% вибірки [281]), причому, $N = N_A + N_B$, де N - всі точки таблиці вихідних даних.

Як критерії регулярності також використовують коефіцієнт кореляції:

$$R = f_3(y_i; \hat{y}_i) \rightarrow \max. \quad (3.19)$$

Основним критерієм оптимізації є критерій мінімуму середньоквадратичної похибки, який знаходиться за допомогою перебору варіантів, що використовують навчальні та перевірочні послідовності даних. Однією з обов'язкових властивостей моделі оптимальної складності є її несуперечливість. Крім того, до моделювання висувається вимога завадостійкості. Властивості моделі не повинні істотно залежати від вибірки, на якій оцінюються параметри цієї моделі. За таких вимог пріоритетним є критерій незміщеності. Використання декількох критеріїв підвищує точність визначення моделі оптимальної складності і робить

вибір моделі більш однозначним [281]. Тому, вибір оптимальної моделі в кожному класі опорних функцій здійснюється за зовнішнім критерієм регулярності з довізначенням за критерієм мінімуму зсуву.

Для зменшення обсягу перебору у вигляді обмеження застосовується допоміжний критерій точності прогнозу (критерій варіації похибки прогнозу) [281]:

$$\Delta^2(C) = f_1(y_i; \hat{y}_i) \rightarrow \min_{N_C} \quad (3.20)$$

Як модель електроспоживання буде використовуватися найкраща індуктивна модель, отримана за багаторядним алгоритмом синтезу моделей МГУАНМ в результаті послідовного випробування моделей, побудованих на основі множини їх опорних видів [268, 281].

3.4.4 Побудова моделей електроспоживання об'єктів водопровідного господарства з урахуванням періоду дискретизації для збору даних та циклічності процесу водоподачі

Для моделювання процесу електроспоживання об'єктів водопостачання застосовано програмне середовище GMDH Shell DS 3.8.8 [282], що є інструментом інтелектуального аналізу даних і прогнозування на основі алгоритму МГУА. За його допомогою здійснюється структурно-параметрична оптимізація математичних моделей, що відображають закономірності багатопараметричних даних.

Як алгоритм синтезу моделей обрано МГУА-подібні нейронні мережі.

Прогнозування за допомогою МГУАНМ є більш гнучким, ніж за допомогою типових лінійних або поліноміальних апроксимацій, і тому є більш точним [283]. МГУАНМ дозволяє виявити та врахувати нелінійні зв'язки та зв'язки між даними та побудувати моделі-кандидати з високою силою прогнозування [283]. Як зазначено в [283], GMDH Shell не вимагає попередньої нормалізації даних; не дотримується принципу абсолютно найкращого налаштування мережі, що значно скорочує час обчислень; автоматично тренує нейронні мережі та застосовує їх для аналізу, таким чином отримуючи прогнози з малою похибкою. Для оптимізації зв'язку нейронів МГУАНМ використовується комбінаторний алгоритм [284]. Ал-

горитм ітеративно створює шари нейронів з двома або більше входами і зберігає лише обмежений набір оптимально складних нейронів, які утворюють початкову ширину шару. Кожен новий шар створюється за допомогою двох або більше нейронів, узятих з будь-якого з попередніх шарів. Кожен нейрон в мережі застосовує функцію передачі (як правило, з двома змінними), що дозволяє переборному комбінаторному пошуку вибрати таку функцію передачі, яка найбільш точно прогнозує на основі тестування даних. Алгоритм повертає лише обмежену кількість нейронів з кожного шару. Оскільки кожен новий шар може з'єднуватися з попередніми шарами, ширина шару постійно зростає. Враховуючи те, як рідко верхні шари покращують популяцію моделей, додатковий розмір наступного шару ділиться на два і генерується лише половина нейронів, сформованих на попередньому шарі, тобто кількість нейронів N на шарі k становить $N_k = 0,5 \cdot N_{k-1}$. Це робить алгоритм швидшим, тоді як ризик зменшення якості моделі низький. Генерація нових шарів припиняється, коли [284]: новий шар не може виявити кращу точність тестування, ніж попередній; якщо помилка тестування була зменшена менш ніж на 1%; якщо кількість шарів досягла певної межі, яку можна визначити.

Зважаючи на вибрану постановку задачі моделювання процесу електроспоживання необхідно побудувати модель виду [268]:

$$y = \sum_{j=1}^m b_j g_j(x) + \xi, \quad (3.21)$$

де y – вихідна змінна, тобто, електроспоживання (отже, $y=w$);

b_j – параметри моделі;

$g(x)$ – m -вимірний вектор-функція від MX вхідних змінних, тобто, визначальних змінних БРЕ;

ξ – незалежний некорельований випадковий вектор з нульовим середнім і скінченною дисперсією.

Пошук моделі електроспоживання виконувався в таких класах НМ: 1 – лінійна; 2 – поліноміальна 1-ого порядку; 3 – поліноміальна 2-ого порядку. На вхід алгоритму синтезу моделей подаються ретроспективні вибірки даних об'ємом n для m визначальних змінних X , а також електроспоживання W . Результатом робо-

ти алгоритму синтезу моделей є формування наборів моделей-кандидатів, кожна з яких є оптимальною в заданому класі опорних функцій (рис. 3.2). Вибір кращої структури математичної моделі електроспоживання об'єкту водопостачання передбачає застосування багатокритеріального вибору моделі. Результатом застосування процедури моделювання є прогнозне значення вихідної змінної, тобто, електроспоживання ($\hat{y} = \hat{w}$). Як стратегію валідації моделей (алгоритму використання «зовнішнього доповнення») вибрано перехресну перевірку по К-блоках [284]. У результаті роботи МГУАНМ сформовано набір моделей-кандидатів, кожна з яких є оптимальною в заданому класі опорних функцій (табл. 3.4).

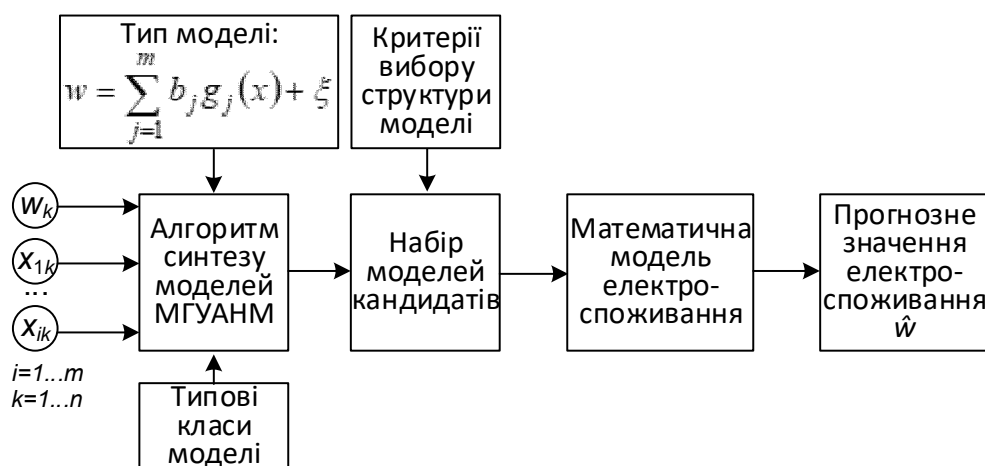


Рисунок 3.2 – Процедура побудови математичної моделі електроспоживання

Значимість змінних визначається за ступенем їх впливу на середньоквадратичне відхилення моделі: змінні в моделі одну за одною замінюються їх середнім значенням і вимірюється середньоквадратична похибка (RMSE) «нової» моделі. Вплив на RMSE є відсоткове значення, яке дозволяє порівнювати змінні [284]:

$$Impact = (R_{var} - R_{ori}) / (R_{all} - R_{ori}) * 100\% \quad (3.22)$$

де R_{var} - RMSE змінної, яка розглядається;

R_{ori} - RMSE з нульовим впливом (вихідна похибка моделі);

R_{all} - є RMSE моделі, де всі змінні замінені їх середнім значенням.

Всі змінні є значимими. Вплив окремих змінних (табл. 3.4) перевищує 100%, оскільки в моделі змінна множиться на іншу змінну або квадрат [284]. Слід зазначити, що малий у порівнянні з іншими рівень значимості змінної $Q_{підн}$ логічно пояснюється її зв'язком із змінними $Q_{под}$ та $Q_{техн.внутр.}$

Таблиця 3.4 – Результати моделювання, перевірки адекватності моделі, точності прогнозу та багатокритеріального вибору моделі електроспоживання в СКВ

Клас моделі	Вид моделі	Значимість змінних, <i>Impact</i> , %				Значення критеріїв адекватності моделі та похибки прогнозу						Площа ДРТ
		Q _{підн}	Q _{под}	Q _{втр}	Q _{техн.втр}	$\Delta^2(A)$	$\Delta^2(B)$	$n_{зм}^2$	R	R ²	$\Delta^2(C)$	
1	$Y1 = -34,05 + 0,38 \cdot N5 + 0,65 \cdot N9$ $N5 = 488,81 + 2,06 \cdot Q_{\text{техн.втр}} + 0,59 \cdot Q_{\text{втр}}$ $N9 = 21,82 + 39,42 \cdot N12 - 38,44 \cdot N13$ $N13 = -179,75 + 0,11 \cdot Q_{\text{підн}} + 1,80 \cdot Q_{\text{техн.втр}}$ $N12 = -174,41 + 0,51 \cdot Q_{\text{под}} + 2,31 \cdot Q_{\text{техн.втр}}$	8,5	112,6	63,2	25,1	0,00091	0,0052	0,0006	0,9942	0,9964	0,0041	0,4228
2	$Y1 = 617,31 - 0,47 \cdot N4 + 0,086 \cdot N4 \cdot N5$ $N5 = 143,137 - 2,87 \cdot Q_{\text{втр}} + 0,02 \cdot Q_{\text{втр}} \cdot N6 + 1,09 \cdot N6$ $N6 = 55,46 + 6,19 \cdot N11 - 5,26 \cdot N16 \cdot N11$ $N11 = -368,64 + 0,63 \cdot Q_{\text{под}} - 0,15 \cdot Q_{\text{под}} \cdot Q_{\text{втр}} + 3,21 \cdot Q_{\text{втр}}$ $N16 = -391,318 + 0,063 \cdot Q_{\text{підн}} - 0,012 \cdot Q_{\text{підн}} \cdot Q_{\text{техн.втр}} + 2,66 \cdot Q_{\text{втр}}$ $N4 = 405,23 + 0,06 \cdot N16 \cdot N17$ $N17 = -174,49 + 0,51 \cdot Q_{\text{под}} + 2,31 \cdot Q_{\text{техн.втр}}$	11,5	121,1	85,2	34,1	0,00089	0,0023	0,0002	0,9998	0,9992	0,0016	0,3375
3	$Y1 = 460,51 - 0,29 \cdot Q_{\text{под}} + 0,04 \cdot Q_{\text{под}} \cdot N2 + 0,42 \cdot N2 - 0,01 \cdot N2^2$ $N2 = -329,81 - 0,01 \cdot N8 \cdot N3 + 0,08 \cdot N8^2 + 1,82 \cdot N3 + 0,02 \cdot N3^2$ $N3 = 33,52 + 0,92 \cdot N6 - 0,19 \cdot N5 \cdot N4 + 0,09 \cdot N6^2 + 0,11 \cdot N4^2$ $N4 = -1622,86 + 2,24 \cdot Q_{\text{підн}} - 0,05 \cdot Q_{\text{под}}^2$ $N5 = 420,31 + 0,006 \cdot Q_{\text{техн.втр}} \cdot Q_{\text{втр}} + 1,54 \cdot Q_{\text{втр}} - 0,003 \cdot Q_{\text{втр}}^2$ $N6 = -897,17 + 2,23 \cdot Q_{\text{под}} - 0,51 \cdot Q_{\text{втр}}^2 + 2,33 \cdot Q_{\text{техн.втр}}$ $N8 = 428,16 - 0,01 \cdot Q_{\text{под}} \cdot N12 + 0,005 \cdot Q_{\text{под}}^2 + 0,01 \cdot N12^2$ $N12 = -391,31 + 0,63 \cdot Q_{\text{підн}} - 0,001 \cdot Q_{\text{підн}} \cdot Q_{\text{техн.втр}} + 2,66 \cdot Q_{\text{втр}}$	14,1	135,2	91,2	45,2	0,00087	0,0022	0,0005	0,9992	0,9962	0,0026	0,512

Примітка:

Клас моделі: 1 – «лінійна НМ»; 2 – «поліноміальна НМ першого порядку»; 3 – «поліноміальна НМ другого порядку»

Побудовані моделі забезпечують мінімум внутрішнього критерію $\Delta^2(A)$, критерію регулярності $\Delta^2(B)$, незміщеності $n_{зм}^2$ та похибки прогнозу $\Delta^2(C)$ (характерним є набуття цими критеріями значень близьких до нульових для всіх моделей-кандидатів), а також максимум коефіцієнта кореляції R в обраному класі функцій. При чому, ускладнення моделі полінома не призводить до значного підвищення якості моделювання та зниження похибки прогнозу [20, 50].

Наступним кроком є вибір кращої структури моделі, який повинен базуватися на комплексному аналізі її адекватності, а також оцінці похибки прогнозу.

Існує велика кількість критеріїв, що застосовуються для визначення якості побудованих моделей прогнозування, їх адекватності, а також похибки прогнозу. Для вибору адекватної математичної моделі рекомендується виконувати їх оцінювання за кількома критеріями одночасно, при цьому, вони не повинні дублювати один одного за своїм змістом і співвідношенням числових значень [285]. Спираючись на дослідження змісту критеріїв, їх взаємозв'язків та взаємодоповнення [285, 286], та враховуючи рекомендації [285] щодо необхідності вибору критеріїв, які за своїм призначенням та ознаками належать до різних груп, в [20, 56, 82] сформовано набір критеріїв для вибору кращої моделі. До нього увійшли критерії: регулярності $\Delta^2(B)$, незміщеності $n_{зм}^2$, похибки прогнозу $\Delta^2(C)$, коефіцієнт детермінації R^2 . Цільові функції багатокритеріального вибору кращої моделі мають вигляд:

$$\begin{cases} \Delta^2(B) = f_1(y_i; \hat{y}_i) \rightarrow \min; \\ n_{зм}^2 = f_2(\hat{y}_{Ai}; \hat{y}_{Bi}) \rightarrow \min; \\ R^2 = f_4(y_i; \hat{y}_i) \rightarrow \max; \\ \Delta^2(C) = f_1(y_i; \hat{y}_i) \rightarrow \min. \end{cases} \quad (3.23)$$

Слід зазначити, що використання сформованого набору критеріїв для вибору кращої структури моделі не завжди дає однозначний результат (табл. 3.4) (одна модель є кращою за одними критеріями, інша – за іншими). Авторами [287] запропоновано здійснювати аналіз адекватності моделі на основі морфологічного

критерію. Його суть полягає у розрахунку площі фігури, створеної вершинами, координати яких відповідають нормованим значенням часткових критеріїв. Кращою є математична модель, якій відповідає фігура з меншою площею, тобто має оптимальне співвідношення часткових критеріїв. Розвиваючи цю ідею, в [20, 56] запропоновано представити сукупність критеріїв багатокритеріального вибору у вигляді діаграми радарного типу (ДРТ). Попередньо всі критерії необхідно привести до одного виду за функцією цілі. Для цього введено величину, обернену коефіцієнту детермінації [20, 56]: $Toler R^2 = 1 - R^2$. Також всі часткові критерії виражено по відношенню до максимального їх значення в відповідній групі моделей.

ДРТ – фігура, що задана вершинами a_i з координатами (x_{ai}, y_{ai}) :

$$\begin{aligned} x_{a_i} &= z_i \cdot \sin \alpha_i : \\ y_{a_i} &= z_i \cdot \cos \alpha_i, \end{aligned} \quad (3.24)$$

де z_i – нормалізоване значення i -го критерію;

α_i - кут, що відповідає i -му критерію:

$$\alpha_i = \frac{2 \cdot \pi \cdot i}{n} \quad (3.25)$$

де n – кількість критеріїв (точок ДРТ).

Площа ДРТ (Area):

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n-1} (x_{a_i} + x_{a_{i+1}})(y_{a_i} - y_{a_{i+1}}). \quad (3.26)$$

Умова вибору кращої структури моделі електроспоживання матиме вигляд:

$$S = f(x_{a_i}, y_{a_i}) \rightarrow \min. \quad (3.27)$$

Застосування запропонованого підходу дозволило зробити однозначний вибір кращої структури моделі електроспоживання. Як модель електроспоживання прийнято поліноміальну модель першого порядку, яка задовольняє умову (3.27).

Аналогічним чином, виконано побудову моделей-кандидатів та вибір кращої структури моделі електроспоживання НС II-го підйому для кожного типового дня відповідного сезону. Результати вибору математичних моделей електроспоживання об'єктів ВГ наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Моделі електроспоживання об'єктів водопостачання

Об'єкт	Сезон	Тип дня	Вид моделі	$\Delta^2(C)$
СКВ	-	-	$Y1 = 617,31 - 0,47 \cdot N4 + 0,086 \cdot N4 \cdot N5$ $N5 = 143,137 - 2,87 \cdot Q_{\text{втр}} + 0,02 \cdot Q_{\text{втр}} \cdot N6 + 1,09 \cdot N6$ $N6 = 55,46 + 6,19 \cdot N11 - 5,26 \cdot N16 \cdot N11$ $N11 = -368,64 + 0,63 \cdot Q_{\text{под}} - 0,15 \cdot Q_{\text{под}} \cdot Q_{\text{втр}} + 3,21 \cdot Q_{\text{втр}}$ $N16 = -391,318 + 0,63 \cdot Q_{\text{підн}} - 0,012 \cdot Q_{\text{підн}} \cdot Q_{\text{втр}} + 2,66 \cdot Q_{\text{втр}}$ $N4 = 405,23 + 0,06 \cdot N16 \cdot N17$ $N17 = -174,49 + 0,51 \cdot Q_{\text{под}} + 2,31 \cdot Q_{\text{техн.втр}}$	0,0016
НС II-го підйому	1	1	$Y1 = 9,51 + 0,25 \cdot N30 \cdot N41$ $N41 = 3,65 + 0,4 \cdot N77 \cdot N83$ $N83 = 11,83 + 0,46 \cdot Q_2 \cdot \Delta H$ $N30 = 3,23 + 0,44 \cdot N77 \cdot N85 - 0,77 \cdot N85$ $N85 = 5,74 + 8,71 \cdot M_{1д} \cdot M_{3д} - 6,05 \cdot M_{2д}$ $N77 = 103,43 - 0,025 \cdot Q_1 + 0,008 \cdot Q_1 \cdot Q_3 - 0,01 \cdot Q_3$	0,0012
		2	$Y1 = 11,05 - 0,73 \cdot N6 + 0,28 \cdot N2$ $N2 = -24,88 + 0,18 \cdot Q_2 + 0,017 \cdot Q_3 \cdot N3 - 0,11 \cdot Q_3$ $N3 = 16,164 - 0,046 \cdot Q_1 + 0,29 \cdot Q_2 \cdot N9$ $N9 = -75,035 - 26,26 \cdot M_{2д} + 54,39 \cdot M_{2д} \cdot M_{3д} - 15,46 \cdot M_{1д} + 37,96 \cdot M_{4д}$ $N6 = -26,42 + 0,01 \cdot Q_3 - 0,007 \cdot Q_3 \cdot N8 + 0,13 \cdot N8$ $N8 = 910,37 - 0,03 \cdot Q_1 + 0,024 \cdot Q_2 \cdot \Delta H - 795,18 \cdot M_{2д}$	0,0037
	2	1	$Y1 = -3773,75 - 503,05 \cdot N9 - 141,86 \cdot N9 \cdot N3 + 1184,62 \cdot N3$ $N3 = 662,3 + 0,91 \cdot N6 - 115,61 \cdot N9$ $N6 = -86,11 - 4,23 \cdot \Delta H \cdot N10 + 2,33 \cdot \Delta H + 34,77 \cdot N10$ $N10 = 45,52 - 0,042 \cdot Q_3 - 0,15 \cdot Q_3 \cdot M_1 + 0,27 \cdot Q_2 \cdot M_{1д}$ $N9 = 8,56 + 0,17 \cdot N12 \cdot N14$ $N14 = -41,51 + 112,36 \cdot M_{3д} \cdot M_{1д} + 219,54 \cdot M_{2д} - 167,85 \cdot M_{3д} - 213,94 \cdot M_{1д}$ $N12 = 22,32 - 0,73 \cdot Q_2 \cdot \Delta H$	0,0026
		2	$Y1 = 8,66 + 0,28 \cdot Q_2 \cdot N2 - 0,07 \cdot Q_2$ $N2 = 7,42 + 0,033 \cdot N5 \cdot N4$ $N4 = 8,57 + 0,005 \cdot Q_3 \cdot N6 - 0,086 \cdot Q_1$ $N6 = -130,22 + 17,41 \cdot N10 + 0,04 \cdot N12$ $N10 = 2,67 - 0,87 \cdot \Delta H \cdot M_{1д} + 106,51 \cdot M_{1д} - 160,66 \cdot M_{2д}$ $N5 = -0,45 + N8 \cdot 0,76 + N12 \cdot 0,016$ $N12 = 9,65 + 0,004 \cdot Q_2 + 1,54 \cdot \Delta H$ $N8 = -5,75 - 0,06 \cdot Q_1 + 156,03 \cdot M_{1д} - 254,06 \cdot M_{3д}$	0,0077
	3	1	$Y1 = 1,52 - 0,005 \cdot Q_2 + 0,97 \cdot N3$ $N3 = 0,28 + 0,17 \cdot Q_1 + 0,94 \cdot N6$ $N6 = -2,17 + 1,76 \cdot M_{3д} + 1,07 \cdot N7$ $N7 = 1,35 + 1,98 \cdot N12 - 1,07 \cdot N14 - 3,52 \cdot N8$ $N14 = -18,05 + 0,28 \cdot Q_3 + 23,59 \cdot M_{1д} + 86,72 \cdot M_{2д}$ $N12 = -6,23 + 0,17 \cdot Q_3 + 15,92 \cdot M_{4д}$ $N8 = 90,63 - 1,67 \cdot Q_2 - 9,22 \cdot \Delta H$	0,0075
		2	$Y1 = 6,52 + 0,06 \cdot N18 \cdot N2$ $N2 = 5,43 + 2,51 \cdot M_{2д}^2 + 0,034 \cdot N5^2$ $N5 = 6,37 + 0,03 \cdot N10 \cdot N11$ $N11 = 69,55 - 26,35 \cdot \Delta H \cdot N12 + 2,29 \cdot \Delta H^2 + 0,71 \cdot N12^2$ $N12 = 32,02 + 0,005 \cdot Q_3 \cdot M_{1д} - 150,87 \cdot M_{1д} + 183,3 \cdot M_{1д}^2$ $N10 = 43,96 - 0,012 \cdot Q_2 + 0,001 \cdot Q_3^2 + 0,02 \cdot N15^2$ $N15 = -274,13 + 0,015 \cdot Q_2 - 0,02 \cdot Q_2 \cdot M_{3д} - 0,002 \cdot Q_2^2 + 78,83 \cdot M_{3д}$ $N18 = 14,93 - 0,05 \cdot Q_1 + 0,008 \cdot Q_1 \cdot M_{3д} - 26,14 \cdot M_{3д}$	0,0098

В таблиці застосовано позначення: Сезон: 1 – «зима»; 2 - «весна-літо-осінь»; 3 - «літо». Тип дня: 1 – «робочий»; 2 – «вихідний».

Як показують результати відбору математичних моделей електроспоживання кращими є поліноміальні НМ першого порядку (за винятком моделі електроспоживання НС для вихідних днів сезону «літо»). Побудовані моделі мають низьку похибку прогнозу електроспоживання, яка не перевищує 1%.

Приклад результатів моделювання електроспоживання на основі обраної моделі для робочих днів сезону «Літо» наведено на рис 3.3. Екзанаційну вибірку сформовано шляхом рівномірного відбору точок з вихідної вибірки. Графік відхилень значень електроспоживання, отриманих на основі моделі, від фактичних значень наведено на рис. 3.4.

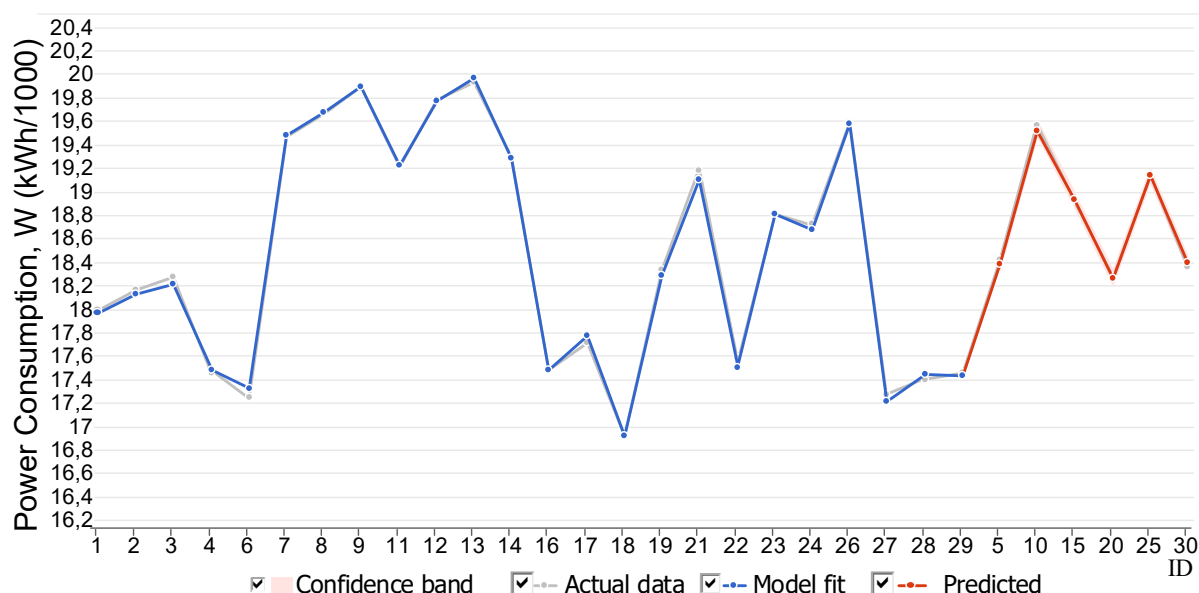


Рисунок 3.3 - Графік результатів моделювання електроспоживання (для робочих днів сезону «Літо»)

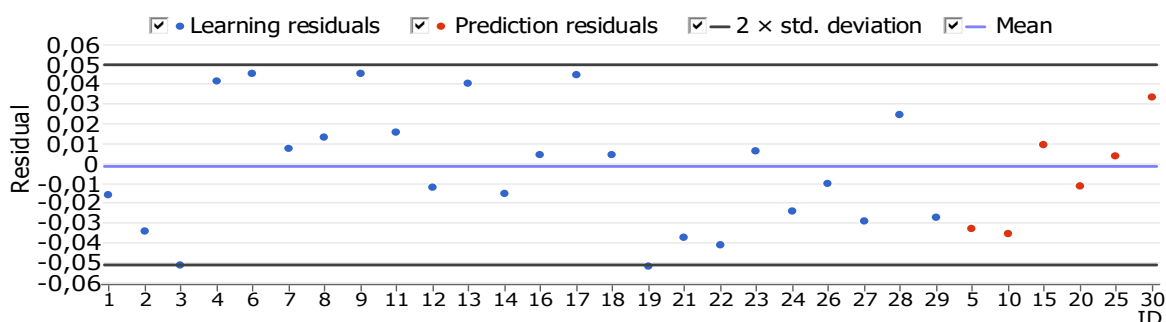


Рисунок 3.4 - Графік відхилень модельних та фактичних значень електроспоживання (для робочих днів сезону «Літо»)

Результати моделювання (табл. 3.6) свідчать, що відхилення фактичних та модельних значень електроспоживання не перевищують 1 %.

Таблиця 3.6 - Фрагмент результатів моделювання електроспоживання («Весна-осінь-літо»)

Дата	08.08	13.08	14.08	15.08	16.08	20.08	21.08	24.08	27.08	19.07	26.07	02.08	10.08	17.08	28.08
Номер точки	19	21	22	23	24	26	27	28	29	5	10	15	20	25	30
Факт, кВт*год	18,34	19,14	17,56	18,81	18,7	19,59	17,25	17,42	17,46	18,42	19,55	18,92	18,28	19,14	18,36
Прогноз, кВт*год	18,29	19,10	17,52	18,82	18,68	19,58	17,22	17,44	17,43	18,39	19,51	18,93	18,27	19,14	18,39
Відхилення, кВт*год	-0,05	-0,04	-0,04	0,01	-0,02	-0,01	-0,03	0,02	-0,03	-0,03	-0,04	0,01	-0,01	0,00	0,03
Відхилення, %	-0,32	-0,22	-0,26	0,04	-0,14	-0,06	-0,19	0,16	-0,18	-0,20	-0,20	0,06	-0,07	0,02	0,20

Кожна з отриманих моделей електроспоживання адаптована до типових умов роботи об'єкту водопостачання, що дає змогу визначити БРЕ для заданого часового проміжку.

3.5 Планування електроспоживання об'єктів водопровідного господарства з урахуванням вибраного часового проміжку дії базового рівня електроспоживання

Завершальним етапом планування електроспоживання є визначення БРЕ на основі очікуваних (планових) значень вхідних змінних, визначених для запланованого типового режиму роботи об'єкту водопостачання та з урахуванням вибраного часового проміжку дії БРЕ [117, 143]. Оскільки за експериментальними даними отримують не точну, а наближену залежність електроспоживання від визначальних змінних, то визначення БРЕ на основі математичної моделі дозволяє отримати оцінку теоретичного середнього значення електроспоживання, отже, необхідною є побудова довірчого інтервалу, всередині якого з високою довірчою ймовірністю буде знаходитись очікуване значення електроспоживання [169]. Побудовані для математичної моделі межі довірчого інтервалу дозволяють врахувати випадковий характер процесу електроспоживання, а також залишкову похибку моделювання та недосконалість моделі з точки зору опису нових даних (невизна-

ченість прогнозу) [169]. BRE слід визначати для кожного моменту часу на проміжку, для якого передбачено виконувати контроль. Результати визначення BRE у вигляді довірчого інтервалу $\hat{w}_{\min} \leq \hat{w} \leq \hat{w}_{\max}$ до його очікуваного значення для кожного моменту часу (для різних об'єктів ВГ) представлено в розділі 5 як складову процедури контролю ефективності електроспоживання.

Процедура визначення BRE (рис.3.5) як результату планування електроспоживання передбачає вибір необхідних значень визначальних змінних, а також відповідної моделі електроспоживання з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту водопостачання, типових умов роботи та часового проміжку дії BRE.

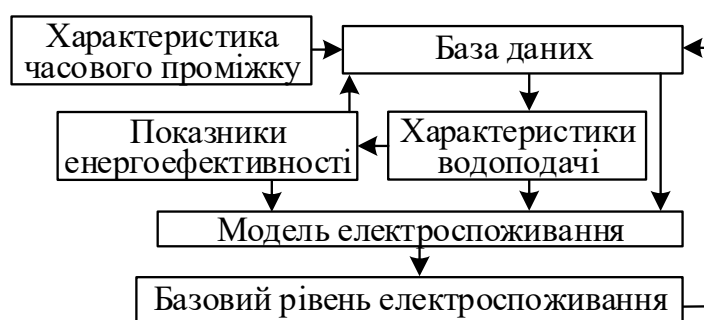


Рисунок 3.5 - Структурна схема визначення BRE

Процедурі планування електроспоживання передуює процедура планування технологічних параметрів процесу водоподачі.

Як планові значення технологічних параметрів процесу водоподачі на рівні НС приймаються їх *усереднені* значення з урахуванням сезону та типу дня. Процедура їх визначення на основі формалізованого опису режиму водоподачі детально розглянута в розділі 4. Добове значення BRE визначається на основі математичної моделі електроспоживання для типового дня відповідного сезону та *усереднених* добових значень визначальних змінних, визначених з урахуванням *типового* профілю добового ГВВ для даного типу дня (рис. 3.6).

Під час організації процедури комплексного контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання, яку розглянуто в розділі 5, передбачено можливість її коригування з урахуванням впливу кліматичних чинників. В цьому випадку, планування добової водоподачі на рівні НС представляє собою процедуру визначення її *прогнозного* значення з урахуванням впливу аномальних кліма-

тичних чинників, яка детально розглянута в розділі 4. Тоді, добове значення БРЕ визначається на основі математичної моделі електроспоживання для типового дня відповідного сезону та *прогнозних* добових значень визначальних змінних, визначених з урахуванням *прогнозного* профілю добового ГВВ для даного типу дня.

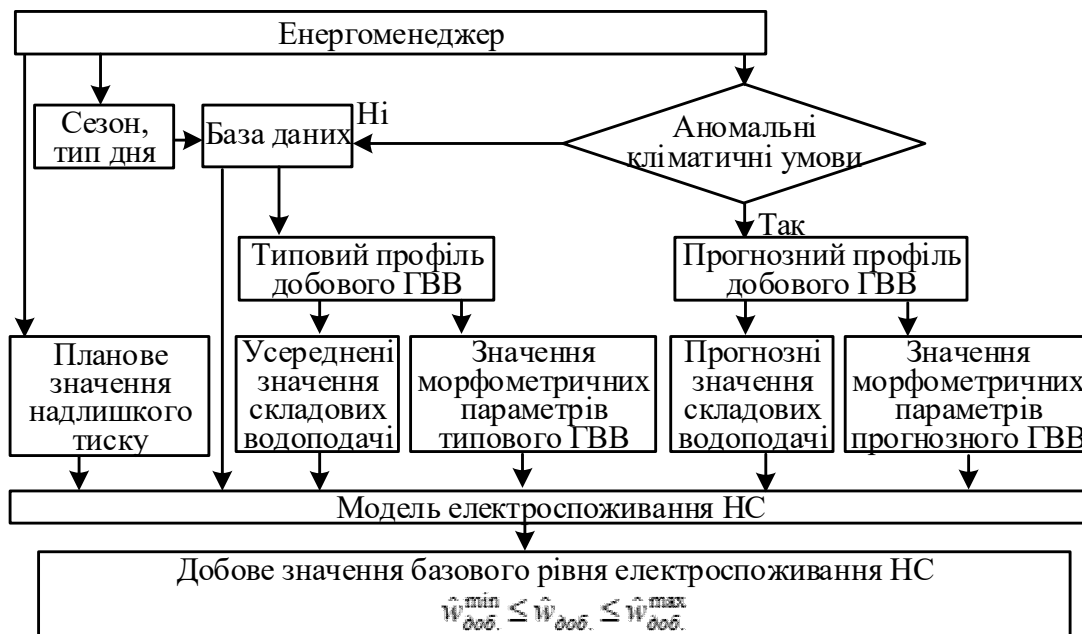


Рисунок 3.6 – Процедура визначення БРЕ НС

У випадку планування водоподачі на рівні підприємства або водозабору впродовж місяця планові значення визначальних змінних визначаються на основі їх *усереднених* добових значень для відповідного сезону та кількості днів в місяці (рис. 3.7). Слід наголосити, що наведені в розділі 4 результати моніторингу циклічних змін витрати води з мережі водопостачання вказують на неспівпадання періодів зміни сезону із початком (кінцем) місяця. В такому випадку необхідно враховувати усереднені параметри різних сезонів впродовж місяця. Місячне значення електроспоживання визначається на основі математичної моделі електроспоживання та планових значень визначальних змінних для відповідного сезону з урахуванням тривалості сезону впродовж розрахункового місяця. У випадку коригування режиму водоподачі з урахуванням впливу кліматичних чинників в окремі дні місяця, місячне значення електроспоживання обчислюється з урахуванням *прогнозних* добових значень визначальних змінних для цих днів.

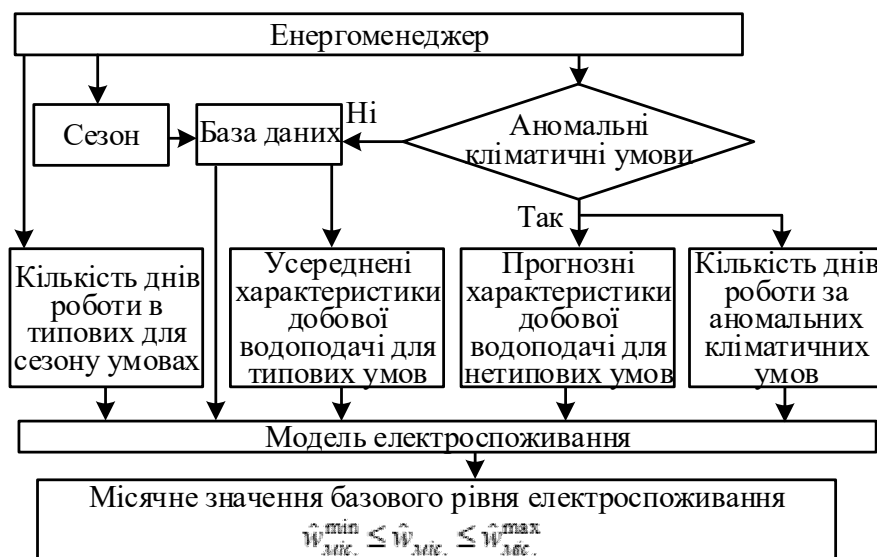


Рисунок 3.7 – Процедура визначення БРЕ СКВ (водозабору)

Вся інформація консолідується та зберігається в базі даних. Алгоритм інформаційного забезпечення процедури планування електроспоживання як складової інформаційного забезпечення комплексного моніторингу енергоефективності наведено в шостому розділі. Результатом розрахунку є БРЕ (середнє значення електроспоживання та його довірчий інтервал) – планове значення електроспоживання для запланованого режиму роботи об'єкту водопостачання.

3.6 Висновки до розділу

1. Аналіз факторного поля чинників, що мають вплив на ефективність електроспоживання об'єктів водопостачання, вказує на наявність великого масиву виробничих та технологічних параметрів, що відображають умови їх роботи, а також показників, що відображають досконалість технологічного процесу, ефективність організації режиму роботи. Для вирішення задачі планування електроспоживання елементів СКВ необхідним є відбір інформативних визначальних змінних з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження. При цьому необхідно враховувати істотність їх впливу на електроспоживання, складність їх вимірювання або обчислення, їх керованість та змінність, а також можливість подальшого контролю цих змінних з метою визначення причин недотримання запланованого рівня електроспоживання.

2. Зважаючи на значну кількість чинників, що впливають на ефективність електроспоживання, наявність взаємозв'язку між ними та складність отримання математичних залежностей для його опису, для побудови моделей енергоспоживання доцільним є використання підходів, які б враховували основні закономірності режиму водоподачі, електроспоживання та вплив зовнішніх чинників, та шляхом обробки інформації, отриманої з системи моніторингу енергоефективності, давали змогу побудувати залежності між вхідними і вихідною змінними. Обмеження у обсягах вихідної інформації зумовило необхідність використання МГУА подібних нейронних мереж, що забезпечило автоматичну структурно-параметричну ідентифікацію математичних моделей електроспоживання об'єктів водопостачання за вибіркою експериментальних даних в умовах, коли механізм взаємодії спостережуваних параметрів є невідомими, та дозволило отримати нефізичну модель високої точності за умови мінімізації упереджень дослідника в результатах моделювання.

3. Запропонована процедура моделювання електроспоживання передбачає урахування циклічних змін процесу водоподачі, зумовлених впливом сезонного та соціального чинників, а результатом її виконання є набір моделей електроспоживання, побудованих для типових умов роботи об'єкту дослідження. Необхідність урахування обох чинників чи одного з них визначається вибраним періодом дискретизації для об'єкту ВГ відповідного ієрархічного рівня. Застосування МГУНМ як алгоритму синтезу моделей дозволило сформувати сукупність моделей-кандидатів, кожна з яких є оптимальною в своєму класі опорних функцій і характеризується мінімумом критеріїв відбору, а оцінка моделей за множиною критеріїв якості моделювання та похибки прогнозу з одночасним використанням морфологічного критерію забезпечила відбір кращої структури моделі.

4. Встановлення БРЕ у вигляді довірчого інтервалу до очікуваного середнього значення електроспоживання, визначеного на основі математичної моделі електроспоживання з урахуванням значень визначальних змінних для запланованого режиму роботи об'єкту водопостачання та вибраного часового проміжку дії БРЕ дозволяє врахувати випадковий характер процесу електроспоживання, а та-

кож залишкову похибку моделювання та недосконалість моделі з точки зору опису нових даних (невизначеність прогнозу).

5. Запропонована процедура планування електроспоживання НС базується на використанні структурованої з урахуванням типу дня відповідного сезону математичній моделі електроспоживання та *усереднених* добових значень визначальних змінних, визначених для запланованого з урахуванням *типового* профілю добового ГВВ режиму водоподачі для даного типу дня, що забезпечує визначення добового значення БРЕ для типових умов роботи НС. Урахування *прогнозних* добових значень визначальних змінних, визначених для запланованого з урахуванням *прогнозного* профілю добового ГВВ режиму водоподачі для даного типу дня, забезпечує можливість коригування добового значення БРЕ з урахуванням впливу аномальних кліматичних чинників.

8. Процедура планування електроспоживання на рівні підприємства або водозабору базується на використанні математичної моделі електроспоживання та планових значень визначальних змінних для відповідного сезону, визначених з урахуванням їх *усереднених* добових значень та тривалості сезону впродовж розрахункового місяця, що забезпечує визначення місячного значення БРЕ з урахуванням циклічних змін процесу водоподачі, зумовленого впливом сезонності. Урахування *прогнозних* добових значень визначальних змінних для окремих днів місяця забезпечує можливість коригування місячного значення БРЕ з урахуванням впливу кліматичних чинників в ці дні.

РОЗДІЛ 4

МОНІТОРИНГ ЦИКЛІЧНИХ ЗМІН ПРОЦЕСУ ВОДОПОДАЧІ В СИСТЕМІ КОМУНАЛЬНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

4.1 Формування інформаційного простору моніторингу циклічних змін технологічного процесу водопостачання

4.1.1 Аналіз чинників, що визначають циклічні зміни процесу водоподачі та формування добових графіків витрати води з мережі водопостачання

Для систем міського водопостачання домінуючу роль відіграє господарсько-питне водоспоживання, яке характеризується нерівномірністю і формується під впливом багатьох, часто некерованих, чинників. На характер водоспоживання впливає низка факторів – сезони, погодні явища, державні та релігійні свята тощо. Споживання води нерівномірне протягом року та протягом доби. Таким чином, водоспоживання – випадковий процес, що формується під впливом кліматичних (зміни температури повітря, виникнення атмосферних явищ і опадів) та соціальних чинників (відображають вплив укладу життєдіяльності населення залежно від типу дня (робочі, вихідні), часу доби) [19, 47, 85]. Режим подачі води в мережу водопостачання визначається поточним водорозбором. Отже, забезпечення ефективної організації технологічного процесу водопостачання вимагає урахування змін водоспоживання, зумовленого впливом сезонних та соціальних чинників.

Основним режимним показником процесу водопостачання є добовий ГВВ [19, 44, 47, 57]. Нехай кожен добовий ГВВ є реалізацією $q_i(t)$ випадкового процесу водоспоживання $Q(t)$, $t \in T$ на річному інтервалі спостереження T , де, T – період спостереження випадкового процесу $T \in [1; 8760]$, i – номер доби, $i \in [1; 365]$, t – номер години доби $t \in [0; 24]$.

Аналіз добових ГВВ НС II підйому водозабору «Дубнівський» КП «Луцькводоканал» показав, що ВВ властивою є сезонність, а форма графіків має циклічний характер. Дослідження об'ємів добової витрати води (ВВ) з мережі водопостачання [19, 47, 85] вказує: об'єми ВВ змінюються протягом року та істотно

знижуються впродовж окремих літніх місяців, що зумовлено відключенням гарячого водопостачання в зв'язку з профілактичними ремонтними роботами. Однією з циклічних складових є добовий цикл. Зміни ВВ в часі відображають циклічність щоденного способу життя: робочий час, час відпочинку. ВВ майже однакова на початку доби і має розкид значень протягом денних годин доби. Добові ГВВ відрізняються один від одного за порами року та типом дня тижня (рис. 4.1).

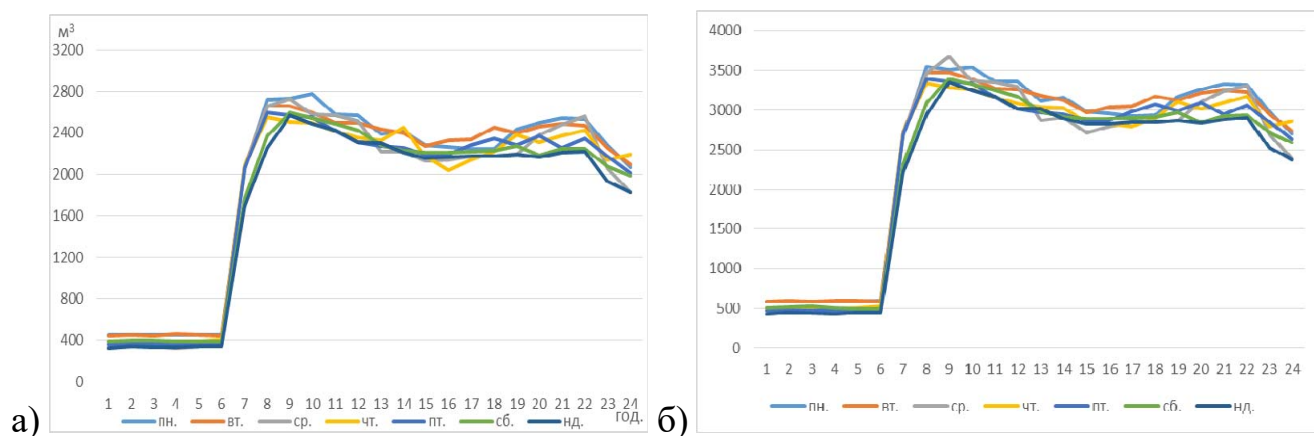


Рисунок 4.1 - Добові графіки витрати води з мережі водопостачання: а) – червень; б) грудень

Дослідження добових ГВВ дозволяє стверджувати [19, 47, 85]: ВВ є нерівномірною не лише протягом доби (що визначається соціологічними умовами), але істотно відрізняється залежно від дня тижня. Крім добової циклічності, спостерігається циклічність протягом тижня і річна повторюваність ГВВ. Вагомий вплив на характер ГВВ має соціальний чинник, зокрема, великі релігійні свята (Різдвяні свята, Пасха, Трійця), а також Новий рік. Крім того, мають місце відхилення в певні моменти часу добових ГВВ окремих днів від загальної тенденції. Однією з причин такого відхилення є аварії в мережі водопостачання.

Отже, за типом виникнення чинники, що визначають формування добового ГВВ діляться на кліматичні та соціальні, їх умовно можна розділити на три групи: циклічні, природні і випадкові (табл. 4.1). Зазначені чинники потребують їх врахування під час планування процесу водоподачі. Вони визначають ефективність організації технологічного процесу водопостачання та мають безпосередній вплив на ефективність режиму електроспоживання [19, 47].

Таблиця 4.1 – Чинники зовнішнього середовища, що мають вплив на формування добового ГВВ

Чинники	Соціальні	Кліматичні
Циклічні	час доби; день тижня; тип дня тижня (робочий, вихідний, святковий, передсвятковий)	сезонна температура повітря;
Природні	вимкнення гарячого водопостачання	вологість; кількість опадів; тривалість опадів
Випадкові	аварії на об'єктах водопостачання	різкі зміни погодних умов (аномально висока температура повітря)

Тому, актуальним завданням є розробка принципів урахування циклічних змін характеру ВВ та виявлення впливу на її нерівномірність соціальних, кліматичних, сезонних чинників як складової системи моніторингу ефективності електроспоживання в СКВ для планування процесу водоподачі та витрат електроенергії.

4.1.2 Формалізація вкладу годинних витрат води з мережі водопостачання у конфігурацію добового графіка

Добову ВВ з мережі водопостачання описують сумарними ступінчастими графіками. Вони мають декілька багатогодинних рівнів, навколо яких відбувається коливання годинних ВВ. Один із способів отримання графіка характерних режимів водоподачі полягає у сортуванні графіка ВВ та його усереднення на кількох характерних інтервалах. Оптимальним значенням подачі води НС на заданому відрізку є усереднене на цьому відрізку значення ВВ, а процес оптимізації режиму водоподачі зводиться до вибору моментів часу ввімкнення/вимкнення НА [288].

Для дослідження тенденцій зміни ВВ з мережі водопостачання необхідно виділити домінуючі складові добового ГВВ. Як математичний апарат аналізу добового ГВВ обрано метод головних компонент (МГК), який здатний виявити достатню кількість латентних факторів під час факторного аналізу даних [205-207, 289] і при цьому не вимагає попереднього вибору груп вхідних значень. МГК виявляє s компонент, що пояснюють усю дисперсію й кореляції вихідних m випадкових величин; при цьому компоненти будуються в порядку спадання поясненої ними частки сумарної дисперсії вихідних величин.

Вихідна інформація представляється у вигляді матриці, яка інтерпретується як реалізація m – мірного випадкового вектору при n спостереженнях [205, 289]:

$$X = [q_{ij}]_n^m. \quad (4.1)$$

де n - кількість спостережень, що визначається об'ємом вибірки;

q_{ij} - значення витрати води в j -й момент часу показника для i -го спостереження ($i = 1, \dots, n; n = \overline{1, 365}$ $j = 1, \dots, m, m = \overline{1, t}$).

Рядок це значення ВВ з мережі водопостачання за 24 години. Столбець є годинні значення ВВ з мережі водопостачання для n спостережень.

Результати спостережень, представлені у стандартизованій формі:

$$Z = [z_{ij}]_n^m \quad (4.2)$$

$$z_{ij} = \frac{q_{ij} - \bar{q}_j}{\sigma_j}, \quad (4.3)$$

де \bar{q}_j – середнє спостережених значень q_{ij} для j -го моменту часу:

$$\bar{q}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{ij}, \quad (4.4)$$

σ_j – середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_{ij} - \bar{q}_j)^2}. \quad (4.5)$$

Властивості даного випадкового вектору з достатньою точністю описуються вектором математичних сподівань [205, 206, 289]:

$$\bar{Z} = (\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_k) \quad (4.6)$$

та кореляційною матрицею:

$$K = [k_{ij}]_m^m \quad (4.7)$$

або матрицею коефіцієнтів кореляцій (матрицею парних кореляцій):

$$R = [r_{ij}]_m^m = \left[\frac{k_{ij}}{\sigma_i \cdot \sigma_j} \right]_m^m. \quad (4.8)$$

Доцільність виконання факторного аналізу визначається наявністю кореляцій між значеннями добової ВВ в генеральній сукупності. Слід очікувати, що значення добової ВВ, що тісно корелюють між собою, повинні також тісно корелювати з одним і тим же фактором. Коректний розв'язок задачі передбачає підтвердження значимості вихідної матриці парних кореляцій та адекватності вибірки.

Необхідно виявити такі лінійні комбінації s головних компонент f_1, f_2, \dots, f_s значень добової витрати води q_1, q_2, \dots, q_m , які пояснюють всю дисперсію і кореляції вихідних показників та при цьому є некорельованими. Аналіз головних компонент зводиться до знаходження лінійного ортогонального перетворення m ознак для отримання сукупності s некорельованих нормованих змінних f_i , дисперсії, яких би володіли властивістю [205, 206]:

$$\sigma^2(\bar{f}_1) \geq \sigma^2(\bar{f}_2) \geq \dots \geq \sigma^2(\bar{f}_s), \quad (4.9)$$

тобто, були вибудовані в порядку зменшення частки сумарної дисперсії вихідних ознак, яку вони пояснюють.

Головні компоненти f_g є некорельованими між собою безрозмірними змінними, які представляють лінійну комбінацію m – змінних [205, 206]:

$$\bar{f}_g = a_{g1}\bar{z}_1 + a_{g2}\bar{z}_2 + \dots + a_{gm}\bar{z}_m, \quad g = 1, \dots, s \quad (4.10)$$

де a_{gj} – вага g -ої головної компоненти в j -ій змінній.

Результатом застосування факторного аналізу стосовно добових ГВВ отриманих з бази даних моніторингу режимів роботи КП «Луцькводоканал» є побудова рівнянь головних компонент (табл. 4.2) та рівнянь складових добової ВВ в різні періоди доби. Компонента F_1 відповідає ВВ у нічний період доби; компонента F_2 – ВВ протягом денних годин доби; компонента F_3 – характеризує проміжні значення ВВ в ранковий та вечірній період.

Таблиця 4.2 – Головні компоненти та складові добової витрати води

Інтерпретація головних компонент	Рівняння головних компонент	Рівняння складових добової витрати води
Витрата води у нічний період доби	$F_1 = -0,874 \cdot Q_1 - 0,903 \cdot Q_2 - 0,922 \cdot Q_3 - 0,942 \cdot Q_4 - 0,908 \cdot Q_5 + 0,801 \cdot Q_6 - 0,594 \cdot Q_7 - 0,115 \cdot Q_8 - 0,151 \cdot Q_9 + 0,221 \cdot Q_{10} + 0,173 \cdot Q_{11} + 0,175 \cdot Q_{12} + 0,201 \cdot Q_{13} + 0,271 \cdot Q_{14} + 0,255 \cdot Q_{15} + 0,153 \cdot Q_{16} + 0,091 \cdot Q_{17} + 0,126 \cdot Q_{18} + 0,036 \cdot Q_{19} - 0,343 \cdot Q_{20} + 0,014 \cdot Q_{21} - 0,124 \cdot Q_{22} + 0,472 \cdot Q_{23} - 0,407 \cdot Q_{24}$	$Q_1 = \sum_{j=1}^6 Q(t_j)$
Витрата води у денний період доби	$F_2 = -0,224 \cdot Q_1 + 0,148 \cdot Q_2 + 0,217 \cdot Q_3 + 0,243 \cdot Q_4 - 0,006 \cdot Q_5 - 0,335 \cdot Q_6 - 0,262 \cdot Q_7 - 0,947 \cdot Q_8 - 0,958 \cdot Q_9 - 0,954 \cdot Q_{10} - 0,963 \cdot Q_{11} - 0,965 \cdot Q_{12} - 0,961 \cdot Q_{13} - 0,925 \cdot Q_{14} - 0,908 \cdot Q_{15} - 0,902 \cdot Q_{16} - 0,913 \cdot Q_{17} - 0,949 \cdot Q_{18} - 0,906 \cdot Q_{19} - 0,902 \cdot Q_{20} - 0,871 \cdot Q_{21} - 0,879 \cdot Q_{22} - 0,504 \cdot Q_{23} + 0,373 \cdot Q_{24}$	$Q_2 = \sum_{j=8}^{22} Q(t_j)$
Витрата води у проміжний період водоспоживання	$F_3 = -0,341 \cdot Q_1 - 0,261 \cdot Q_2 - 0,233 \cdot Q_3 - 0,178 \cdot Q_4 - 0,181 \cdot Q_5 + 0,457 \cdot Q_6 - 0,706 \cdot Q_7 - 0,235 \cdot Q_8 - 0,177 \cdot Q_9 - 0,139 \cdot Q_{10} - 0,117 \cdot Q_{11} - 0,092 \cdot Q_{12} - 0,102 \cdot Q_{13} - 0,199 \cdot Q_{14} - 0,164 \cdot Q_{15} - 0,137 \cdot Q_{16} - 0,057 \cdot Q_{17} + 0,221 \cdot Q_{18} + 0,334 \cdot Q_{19} - 0,158 \cdot Q_{20} + 0,429 \cdot Q_{21} + 0,423 \cdot Q_{22} - 0,689 \cdot Q_{23} - 0,6179 \cdot Q_{24}$	$Q_3 = \sum_{j=(7,23,24)} Q(t_j)$

При цьому, значення годинної ВВ, які є домінуючими у визначенні кожної з компонент, слід вважати такими, що утворюють відповідні складові добової ВВ з мережі водопостачання впродовж дня.

4.1.3 Формування ознакового простору для опису добового графіка витрати води з мережі водопостачання

Створення БД добової ВВ в рамках системи моніторингу режимів роботи СКВ є одним із підходів до оптимізації режиму роботи об'єктів водопостачання. Підвищення інформативності результатів моніторингу циклічних змін фактичної ВВ потребує формування інформаційного ознакового простору за допомогою комплексного опису добової ВВ та характеристики її нерівномірності.

Аналіз річного графіка добової ВВ з мережі водопостачання протягом року вказує на коливання об'ємів ВВ залежно від сезону [19, 47]. Тому для опису ГВВ для виявлення впливу сезонності доцільна його характеристика за об'ємами води.

Добові ГВВ характеризуються значною нерівномірністю та відмінністю для різних днів тижня. Як показали дослідження, можлива наявність великої кількості різних за формою добових ГВВ з однаковими значеннями статистичних характе-

ристик [19, 85]. Тому для опису добових ГВВ з метою виявлення впливу соціальних чинників необхідно враховувати саме їх форму. Природа добового ГВВ дозволяє представити його у вигляді багатокутника певної форми в радіолокаційній графіці - діаграми радарного типу (ДРТ). Тому, для отримання більш детальної оцінки нерівномірності ГВВ доцільно скористатися морфометричним підходом, який є одним з інструментів дослідження різноманітності та аналізу фігур різної форми та розмірів [290]. Використання морфометричного апарату дозволяє здійснити комплексну і детальну оцінку форми добового ГВВ [19, 40, 71, 85].

Отже, опис добового ГВВ та його нерівномірності доцільно виконати за допомогою трьох блоків (рис. 4.2): 1) блок характеристики добової ВВ – містить значення добової ВВ та її складові компоненти (значення ВВ в різні періоди доби); 2) блок характеристики нерівномірності ВВ – містить блок абсолютних характеристик нерівномірності добової ВВ та блок показників нерівномірності добового ГВВ; 3) блок опису форми ГВВ – містить морфометричні параметри.

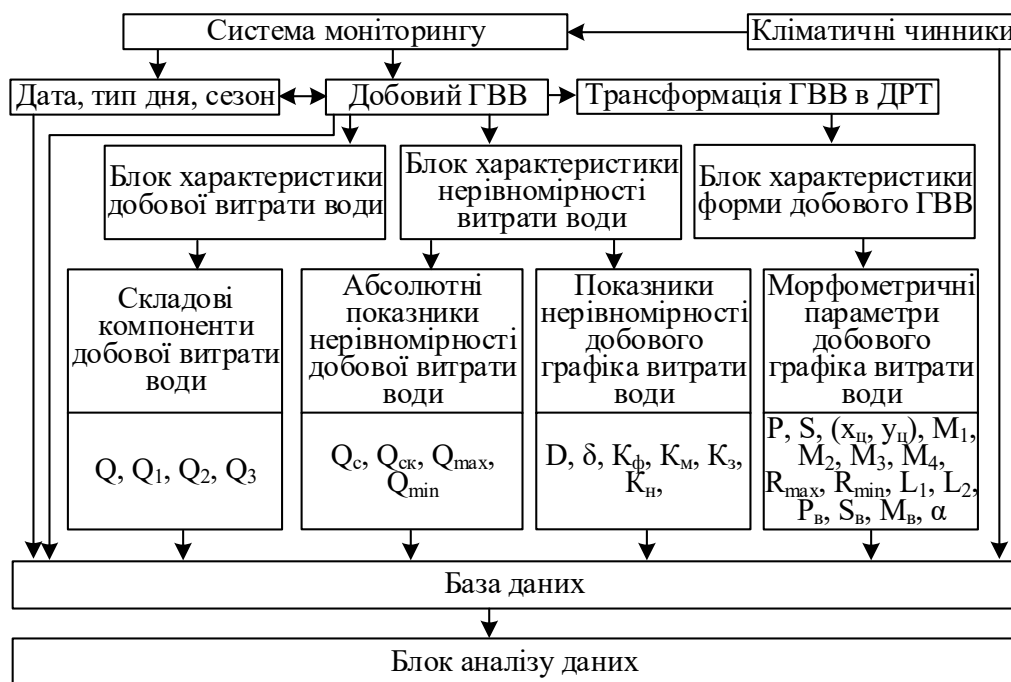


Рисунок 4.2 - Формування бази даних моніторингу витрати води з мережі водопостачання

Зміна сезонів супроводжується зміною об'ємів ВВ з мережі водопостачання. Отже, характеристики блоків 1 та 2 формують інформаційний ознаковий простір для виявлення впливу на ВВ сезонних чинників. Зміна укладу життя населення в

вихідні, святкові та робочі дні зумовлює зміну форми добового ГВВ. Отже, характеристики блоку 3 формують інформаційний ознаковий простір для виявлення впливу соціальних чинників на ВВ з мережі водопостачання. Набір характеристик добової ВВ та її нерівномірності протягом конкретного типу дня певного сезону забезпечують формування БД моніторингу фактичної ВВ з мережі водопостачання. Процедура формування БД передбачає виконання таких етапів (рис. 4.2):

1) отримання інформації. З системи моніторингу режимів роботи об'єктів водопостачання отримують інформацію про щогодинну ВВ протягом дня. Фіксують дату, тип дня та сезон. Будують ступінчастий добовий ГВВ, в якому кожному моменту часу відповідає певне значення витрати води;

2) опис графіка за об'ємами ВВ. Визначають сумарну добову ВВ Q . Визначають складові ВВ в різні періоди доби, що відображають ВВ в нічний період Q_1 , період основного водоспоживання протягом денних годин Q_2 , а також проміжний період ранішнього та вечірнього водоспоживання Q_3 ;

3) опис нерівномірності добового ГВВ за об'ємами ВВ [19, 85]. Для цього визначають: 1) параметри, які відображають абсолютні характеристики нерівномірності ВВ з мережі водопостачання: середнє Q_c , середньоквадратичне Q_{ck} , максимальне Q_{max} (мінімальне Q_{min}) значення протягом доби тощо; 2) показники, які є характеристикою нерівномірності добового ГВВ: дисперсію D та середньоквадратичне відхилення δ , коефіцієнт форми K_f , коефіцієнт максимуму K_m , коефіцієнт заповнення K_z та коефіцієнт нерівномірності K_n , які вважаються класичними показниками нерівномірності добових графіків [291];

4) опис форми добового ГВВ [19, 85]. Для цього добовий ГВВ представляють у вигляді кругової ДРТ та визначають морфометричні параметри утвореної фігури: базові (X, Y координати; периметр P ; площа S ; координати центра ваги (x_u, y_u); округлість M_1 ; компактність M_2 ; видовження M_3 ; випуклість M_4) та похідні (радіус вписаного R_{min} та описаного R_{max} кіл; головна L_1 та додаткова L_2 вісь видовження; периметр випуклості P_6 ; площа випуклості S_6 ; компактність випуклості M_6 ; кут осей видовження α). Детальний опис морфометричних показників нерівномірності ГВВ представлено в [19, 85].

5) Добовий ГВВ та отримані набори характеристик добової ВВ та нерівномірності ГВВ заносять в БД з фіксуванням дати спостереження, типу дня, сезону.

Дисперсія та середньоквадратичне відхилення забезпечує оцінку нерівномірності добового ГВВ, як узагальненого відхилення від середнього значення добової ВВ з мережі водопостачання. Коефіцієнт заповнення та коефіцієнт максимуму дають можливість оцінити наскільки значущими є максимуми ВВ, у порівнянні із середнім значенням. Коефіцієнт нерівномірності характеризує відношення між максимальним і мінімальними значеннями. Одночасне фіксування кліматичних чинників розширює результати аналізу нерівномірності ВВ.

Морфометричні параметри відображають зміну добового ГВВ залежно від типу дня. Площа ГВВ відповідає добовому значенню об'єму ВВ, ріст периметру – росту добової нерівномірності ВВ, співвідношення осей видовження фігури – ВВ в певні години доби. Округлість характеризує нерівномірність ВВ протягом доби [40, 290]. Компактність дозволяє врахувати проміжні значення добового ГВВ та охарактеризувати добову нерівномірність як відношення всіх піків та провалів ДРТ (чим менше її значення, тим менша щільність графіку через наявність значних піків і провалів) [40, 71, 290]. Видовження дозволяє оцінити співвідношення між об'ємами ВВ у нічний період та пікового водоспоживання (чим більше його значення, тим меншою є відмінність між значеннями максимального водоспоживання в денну пору та нічного мінімуму). Випуклість враховує множину максимальних значень добового ГВВ, зумовлену нерівномірністю ВВ протягом денних годин доби (чим менше її значення, тим більша загальна нерівномірність, а піки та провали у графіку є істотнішими). Значення випуклості відображає характеристику нерівномірності, що має певну аналогію з коефіцієнтом максимуму та коефіцієнтом заповнення графіка, але охоплює множину локальних максимумів добового ГВВ, тому більш точно описує характер нерівномірності [40, 290]. Зміщення координат центра ваги x_u, y_u відносно центру координат x_0, y_0 зростає з ростом нерівномірності ДРТ, тобто, реагує на піки чи провали графіка. Кут видовження між головною віссю ДРТ та віссю абсцис дозволяє охарактеризувати зміщення максимуму ВВ в часі [40, 290]. Аналіз зміни даного параметру забезпечує урахування

зміни ритму життя населення у вихідні та святкові дні у порівнянні з робочими.

Формування розширеного ознакового інформаційного простору характеристик добової ВВ дає змогу підвищити інформативність результатів моніторингу нерівномірності фактичної ВВ та здійснити комплексний аналіз добових ГВВ.

4.2 Виявлення типових класів подібних графіків фактичної витрати води з мережі водопостачання

4.2.1 Формальна постановка задачі класифікації добових графіків витрати води

Для ідентифікації циклічних змін процесу водоподачі в роботах [19, 44, 47, 59, 77, 85] запропоновано виконати пошук класів подібних добових ГВВ з мережі водопостачання з використанням теорії розпізнавання образів. Об'єкти кластеризації – добові ГВВ. Ознаки – характеристики добового ГВВ та його нерівномірності. Кластер - група подібних добових ГВВ.

Нехай задано множину об'єктів (добових ГВВ) $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, які описано множиною ознак $X^m = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$. Тобто, кожен об'єкт $d_j \in W$, $j = \overline{1, n}$ представлений описом виду $d_j = (x_{ij} \in X)$, $i = \overline{1, m}$. Необхідно:

1) синтезувати підмножину $\{x_\eta^*\} = X^* \subset X^m$, $\eta = \overline{1, m^*}$, $m^* < m$ із наведених ознак опису ГВВ (ансамбль інформативних ознак [292]), найкращу за заданим критерієм оптимальності, яка б дозволила:

2) класифікувати всі ГВВ D на $k < n$, $k = \overline{1, K}$ однорідних груп.

3) побудувати класифікатор для визначення належності нових спостережень до одного з типових класів.

Завдання кластеризації полягає у визначенні груп добових ГВВ, які є найбільш близькими один до одного за деяким критерієм. При цьому ніяких припущень про їхню структуру не здійснюється [205, 206]. Зважаючи на відсутність інформації щодо можливих класів доцільним є використання процедур розпізнавання образів «без учителя» (автоматичної класифікації), зокрема, кластерного

аналізу (КА) [19, 44, 47, 77, 85]. На початковому етапі слід застосувати ієрархічний агломеративний метод КА [205]. Оскільки методи ієрархічного КА не передбачають визначення оптимальної кількості отриманих кластерів, а лише послідовно групують кластери, то одним з питань є оцінювання результатів та пошук розбиття, що найкраще відповідає структурі даних, тобто перевірка обґрунтованості кластерного рішення. Однак, в стандартних статистичних пакетах оцінка результатів розбиття на класи не передбачена [289], тому *алгоритм ієрархічного КА слід застосувати як попередній для визначення числа класів, а потім необхідним є застосування методу k -means* [19, 47, 85]. Його використання дозволить сформувати групи подібних добових ГВВ [19, 44]. Однак КА не дає ні правил, ні чітких критеріїв оцінки якості класифікації.

Наступний етап – використання дискримінантного аналізу (ДА) [19, 47, 48, 85] - одного з методів розпізнавання образів «із учителем», який дає можливість класифікувати добові ГВВ на основі навчання за емпіричними даними (навчальними вибірками). Передбачається, що вихідні дані поряд з класифікаційними ознаками містять групуючу змінну, яка визначає належність добового ГВВ до певного класу. ДА передбачає визначення правила, яке дасть змогу відрізнити один клас від іншого. Застосування ДА забезпечує можливість інтерпретації міжгрупових відмінностей (визначення способу дискримінації наявних груп); пошуку інформативних змінних, які найкраще відрізняють (дискримінують) добові ГВВ, що належать до різних груп; класифікації спостережень у різні групи - прогнозування імовірності належності до класу; перевірку якості (результатів) кластеризації.

Таким чином, використання методів КА забезпечить виявлення прихованих закономірностей та розбиття добових ГВВ на групи, тобто формування навчальної вибірки, що є основою застосування ДА для уточнення класифікації. Побудова із застосуванням стандартної процедури ДА класифікаційних функцій забезпечить визначення належності добових ГВВ до одного з типових класів. Застосування класифікаційних функцій за своєю суттю відображає прогнозування імовірності належності об'єкту до деякого класу. Отже, правильність їх побудови разом з багатьма іншими факторами визначається об'ємом вибірки, утвореної

об'єктами, що належать до одного кластеру.

Зважаючи на можливість утворення малих вибірок, для побудови класифікаційних функцій доцільним є застосування методів самоорганізації моделей. Підхід самоорганізації може бути використаний в умовах мінімального обсягу ап'іорної інформації. Також можливим є прогнозування без урахування деяких визначальних чинників. Це пояснюється тим, що в складних системах фактори корельовані між собою, отже, вимір одного фактора містить інформацію про інші пов'язані з ним фактори. Таким чином, завершальним кроком процедури класифікації добових ГВВ є побудова правил класифікації, здатних до самоорганізації.

У роботі [292] зазначено, що погляд на кластеризацію як на модель дозволяє перенести в теорію КА основні поняття й принципи теорії самоорганізації моделей на основі МГУА [293, 294]. Для вирішення задач класифікації зручним є використання методів побудови правил класифікації, які передбачають їх коригування, наприклад, шляхом додавання одного або декількох доданків. МГУА є одним з найбільш ефективних методів такого типу. В основі даного методу лежать не тільки принципи навчання з учителем, а й самоорганізація, характерна для систем, здатних до самонавчання, що дозволяє виконувати спрямований адаптивний пошук оптимальних рішень [265] (автоматично знаходити взаємозалежності в даних, вибирати оптимальну структуру кластерів, налаштовувати (оцінювати) параметри). За допомогою МГУА, на підставі значень категоріальних і метричних змінних добовий ГВВ може бути зарахований до одного з заданих класів.

4.2.2 Процедура класифікації добових графіків витрати води та математичний опис її етапів

Процедура виявлення подібних добових ГВВ полягає у вирішенні низки завдань шляхом послідовного використання методів КА та ДА [19, 47, 85], що є основою формування інформаційної бази знань [57]. На її основі можливе уточнення правил класифікації та побудови класифікаторів, здатних до самоорганізації.

Узагальнений алгоритм класифікації об'єктів, придатний для вирішення задачі класифікації добових ГВВ, представлено на рис. 4.3.

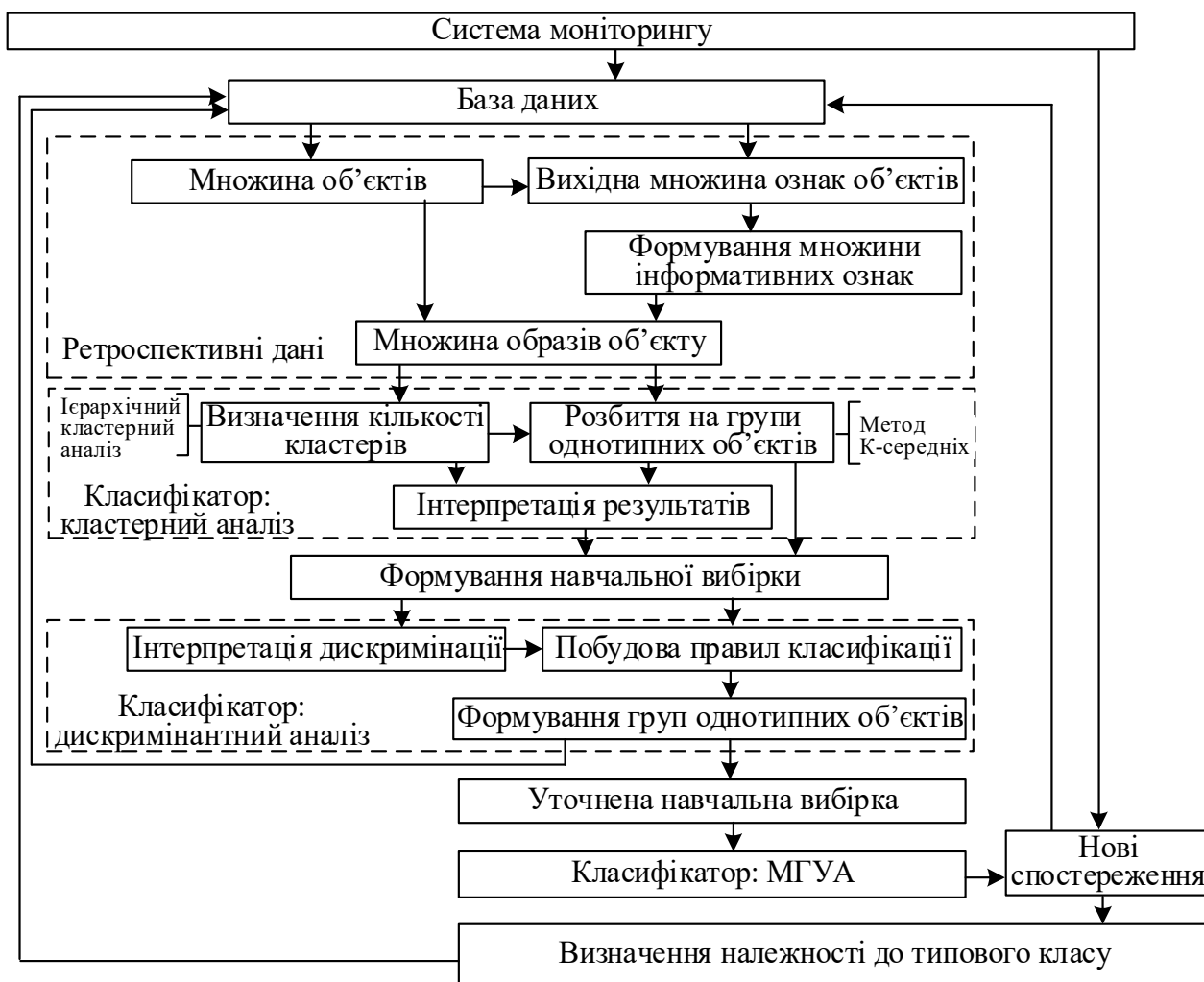


Рисунок 4.3 – Алгоритм класифікації ГВВ та завдання, що потребують вирішення

Математичний опис основних етапів запропонованого алгоритму потребує математичної постановки низки задач, що потребують послідовного вирішення.

Крок 1 – автоматична класифікація «без учителя»; тип класифікатора – КА.

Кожен добовий ГВВ d_j з множини D описано системою m ознак і представлено точкою в лінійному просторі ознак: $d_j \in X^m$. Вважаємо: всі m характеристик є значимими для опису об'єкту X_i ; *a priori* припускаємо, що кожен з m показників має однакову вагу. Необхідно розділити множину X^m на k непересічних класів ($k < n$), що складаються з елементів з подібними властивостями [205-207]:

$$X^m = \bigcup_{i=1}^k \omega_f, \quad \omega_f \cap \omega_s = \emptyset, \quad f, s \in \{1, 2, \dots, k\} \quad (4.11)$$

так, щоб кожен з добових ГВВ d_i належав лише одному кластеру. Причому

об'єкти, які належать до одного кластера, були “подібними”, а об'єкти, які належать до різних кластерів, були “відмінними” між собою, а саме розбиття задовольняло певні обмеженням критерій оптимальності;

Крок 2 – автоматична класифікація «з учителем»; тип класифікатора – ДА.

Початкова таблиця спостережень розбита на S непересічних підмножин рядків, де кожному рядку X поставлений у відповідність деякий клас S_l , $l=1,2,...,k$, причому будь-якому з k класів належить не менше одного добового ГВВ. Потрібно встановити правило, згідно з яким за значеннями координат вектора X добовий ГВВ d_i відносять до одного з можливих класів S_l [205-207]:

$$S_l = \{X^m: h(X) = l\}, l = 1, 2, ..., k, \quad (4.12)$$

де S_l - це $n_l \times m$ -мірні області в просторі $M(X)$ можливих значень аналізованого багатовимірного вектору ознак X^m ;

$h(X)$ – дискримінантна функція.

Вирішальне правило $h(X)$ має забезпечувати розбиття $S = (S_1, S_2, ..., S_k)$ всього простору $M(X)$ на k непересічних областей та бути оптимальним (байєсівським) - мати мінімальні втрати порівняно з іншими класифікаціями:

$$h^{onm}(X) = \arg \min_{h(X)} C[h(X)], \quad (4.13)$$

де $C[h(X)]$ - втрати від неправильної дискримінації даним правилом.

Крок 3 – побудова класифікатора, здатного до самоорганізації; тип класифікатора – МГУА.

Кожен добовий ГВВ d_j з множини D описано системою m ознак і представлено точкою в лінійному просторі ознак: $d_j \in X^m$. Для кожного добового ГВВ d_j відома його класифікація $y_j \in [1, k]$, де k - число класів. Алгоритм кластеризації розглядається як функція $f: X^m$, яка будь-якому добовому ГВВ $d \in X^m$ ставить у відповідність номер кластера $y \in \mathfrak{R} = \{r_1, r_2, ..., r_k\}$. Необхідно знайти модель вирішального правила класифікації (модель класифікатора) [293]:

$$\hat{y}(d) = f(X_M, \Theta_M), \quad (4.14)$$

де Θ_M - вектор невідомих параметрів;

X_M - деяка підматриця матриці X , $\dim X = n \times M$, $M \leq m$.

Завдання структурно-параметричної ідентифікації моделі (4.14) потребує вирішення задачі оптимізації множини аргументів матриці X , перетворених в заданому класі функцій (3.11) та задачі оптимізації значень параметрів Θ_M функції f , що залежить від множини аргументів X_M (3.12). Отримана в результаті їх вирішення модель класифікатора добових ГВВ повинна задовольняти умову (3.10), тобто бути оптимальною.

4.2.3 Формування груп подібних графіків витрати води з мережі водопостачання

Процедура класифікації ГВВ базується на використанні стандартних процедур КА і ДА. Опис її етапів, отриманих результатів класифікації та перевірку їх обґрунтованості наведено в працях [19, 44, 48, 77, 85]. Ці результати підтвердили припущення про наявність закономірностей у характері ВВ залежно від сезону та типу дня, дозволили сформувати навчальну вибірку та інформаційну базу знань і стали основою подальших досліджень для удосконалення процедури моніторингу циклічних змін процесу водоподачі. Для збереження логічності висвітлення результатів дослідження доцільно розглянути особливості застосування кластерного та дискримінантного аналізу з точки зору вибраного об'єкту класифікації та відзначити результати основних етапів.

1. Формування наборів класифікаційних ознак. Оскільки одночасне врахування багатьох ознак, що описують ГВВ, ускладнює інтерпретацію отриманих результатів, то групування добових ГВВ виконувалось у два етапи [19, 44, 48, 77, 85]: 1 етап - за впливом сезонності; 2 етап - за впливом соціальних чинників (типом дня) з урахуванням результатів першого етапу.

На першому етапі використано характеристику добового ГВВ за об'ємами водоподачі та класичні показники його нерівномірності: x_1 - об'єм добової ВВ; x_2 - ВВ у нічний період доби; x_3 - ВВ у денний період доби; x_4 - ВВ у проміжний період ранішнього та вечірнього водоспоживання; x_5 - максимальне значення добової

ВВ; x_6 - мінімальне значення добової ВВ; x_7 - мінімальне значення ВВ протягом денних годин доби; x_8 - середньодобове значення ВВ з мережі; x_9 - середнє значення ВВ протягом денних годин; x_{10} - дисперсія; x_{11} - дисперсія за день.

На другому етапі для врахування форми добового ГВВ використано морфометричні параметри: x_{12} - периметр ДРТ; x_{13} - площа ДРТ; x_{14} - R_{\min} ; x_{15} - R_{\max} ; x_{16} - округлість; x_{17} - компактність; x_{18} - видовження; x_{19} - головна вісь видовження; x_{20} - додаткова вісь видовження; x_{21} - кут видовження; x_{22} - випуклість; x_{23} - периметр випуклості; x_{24} - площа випуклості; x_{25} - компактність випуклості; x_{26} - зміщення координат центра ваги.

2. Формування наборів інформативних ознак. Важливою умовою достовірності результатів є «ортогональність» даних, на основі яких проводиться дослідження, тобто між показниками не повинно бути високих значень кореляції. Формально простір ознак є m -вимірним. Але в зв'язку з кореляцією між ознаками він повинен бути перетвореним в простір меншої розмірності, який містить лише інформативні ознаки. Властивості простору класифікаційних ознак з достатньою точністю описуються [206] матрицею коефіцієнтів кореляцій (матрицею парних кореляцій). Тому, на попередньому етапі відбір інформативних змінних здійснено на основі аналізу тісноти зв'язку між ознаками за шкалою Чеддока [202, 206].

3. Визначення числа кластерів. Незважаючи на те, що КА має певні недоліки (склад і кількість кластерів залежить від методів об'єднання і оцінки дистанційних коефіцієнтів), аналіз отриманих результатів розбиття дозволив зробити такі висновки [19, 44]: чітко проглядається тенденція об'єднання в один кластер добових ГВВ, характерних для певної пори року, що підтверджує вплив сезонності на характер ВВ з мережі водопостачання; чітко проглядається тенденція об'єднання в один кластер добових ГВВ, що відповідають певному типу дня тижня: вихідний чи робочий; характерним є наявність кластеру «Нерегулярні дні», який об'єднує добові ГВВ різних сезонів та днів тижня, наявність якого може бути обумовлена соціальними чинниками (релігійними святами та підготовкою до них населення), погодними умовами (посуха, аномальна спека), аварійними ситуаціями в мережі тощо.

4. Розбиття добових ГВВ на групи однотипних та формування навчальної вибірки. Кількість класів визначено за допомогою алгоритму ієрархічного КА, а методом k-середніх визначено належність кожного із ГВВ до певного кластеру.

Застосування методів КА до добових ГВВ отриманих з бази даних моніторингу режимів роботи КП «Луцькводоканал» дало змогу отримати навчальну вибірку, яка містить розбиття добових ГВВ на чотири кластери за сезоном (1 клас «зима» – містить добові ГВВ, що відповідають холодній порі року; 2 клас «весна-літо-осінь» – містить добові ГВВ, що відповідають весняно-літньо-осінньому періоду; 3 клас «літо» – містить добові ГВВ, що відповідають періоду профілактичних робіт у системі теплопостачання та гарячого водопостачання; 4 клас «нерегулярні дні» – містить добові ГВВ різних місяців та сезонів) та для кожного типового сезону на три кластери за типом дня (1 клас «робочий день» – утворюють добові ГВВ, що відповідають робочим дням; 2 клас «вихідний день» – утворюють добові ГВВ, що відповідають вихідним та святковим дням; 3 клас «нерегулярні дні» – містить ГВВ, що відповідають дням різного типу) [19, 44, 85]. Слід зазначити, добовий ГВВ, що відповідає першому січня формує окремий клас, що підтверджує вплив соціальних чинників на характер ВВ з мережі водопостачання.

Метод k-середніх передбачає перевірку статистичної значимості відмінностей між виділеними кластерами та надійності (значимості) виділених кластерів шляхом визначення статистичної достовірності належності дисперсії кожного фактора для різних кластерів до однієї генеральної сукупності за допомогою F-тесту за критерієм Фішера [205, 206]. Результати дисперсійного аналізу, виконаного для оцінки значимості відмінностей кількісних характеристик між класами та ефективності проведеної класифікації на задане число кластерів [19, 85], показали, що найбільш високими у вибірці змінних значеннями F-показників критерію Фішера характеризується x_1 – добова ВВ (для етапу 1) та x_{18} – видовження (для етапу 2). Результати перевірки правильності кластеризації добових ГВВ та тестування результатів кластеризації з погляду надійності (значимості) виділених кластерів, що детально описані в [19, 85], підтвердили обґрунтованість розбиття сукупності спостережень на попередньо вибрану кількість кластерів, правильність процедур

їх побудови, надійність виділених кластерів, а також однорідність класифікаційних ознак добових ГВВ, що об'єднані в один кластер, та значимість їх внеску в розподіл добових ГВВ на групи. Отримані результати використано для уточнення результатів розбиття за допомогою ДА.

5. Уточнення навчальної вибірки на основі побудови правил класифікації.

Реалізований в сучасних пакетах статистичної обробки експериментальних даних ДА заснований на максимізації відношення міжгрупової дисперсії до внутрішньогрупової, використовує покрокові методи регресійного аналізу, критерій зовнішнього доповнення у вигляді критерію Фішера для відбору ознак та апріорні знання про коваріаційні матриці і функції розподілу тощо [295]. Набір вихідних ознак X_1, \dots, X_m $\dim \mathbf{X}_j = n \times 1, j = \overline{1, m}$ оптимізується за допомогою покрокової процедури, в результаті чого отримують новий простір ознак меншої розмірності, який містить набір дискримінантних змінних, які найкраще розділяють об'єкти на групи. Як міра розрізнення приналежності до класу деякого спостереження (правильності віднесення до класу) використовується вибірка відстань Махаланобіса від точки спостереження до центру шуканого класу в багатовимірному просторі дискримінантних змінних, яка узагальнює Евклідову відстань [295]:

$$\min M^2(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_k) = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_k)^T \Sigma_k^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_k), k = \overline{1, K} \quad (4.15)$$

Для визначення приналежності деякого спостереження до певного класу використовуються класифікаційні функції, побудовані з урахуванням сформованого набору дискримінантних змінних:

$$h_{ik} = b_{k0} + b_{k1}x_{i1} + \dots + b_{km}x_{im}, \quad k = \overline{1, K} \quad (4.16)$$

де $b_{k,i}$ - параметр при значенні i -ої змінної.

Належність до певного класу визначається за максимумом значення (4.16):

$$k^* = \arg \max_{k=\overline{1, K}} h_k, \quad (4.17)$$

яке відповідає максимуму ймовірності приналежності до класу.

Для усунення суб'єктивізму у виборі параметрів застосовано покроковий ал-

горитм ДА з включенням, в якому змінні вводяться послідовно, виходячи із їхньої здатності розділяти класи. Результати ДА, що детально описані в [19, 48, 85], підтвердили статистичну значущість дискримінації, значущість та інформативність ознак. Найбільший внесок з точки зору дискримінації груп за впливом сезонності має об'єм добової витрати води з мережі (x_1), а за впливом соціальних чинників - видовження (x_{18}).

Застосування процедури крос-перевірки є основою коректного застосування дискримінантної моделі для вирішення завдання класифікації. Отже, для побудови дискримінаційних функцій та простих класифікаційних функцій використано відкоректовану навчальну вибірку (отриману шляхом виключення добових ГВВ, некоректно віднесених до певної групи). Перевірочну вибірку утворили добові ГВВ, виключені з навчальної вибірки через некоректну класифікацію. Їх повторну класифікацію виконано за допомогою класифікаційних функцій (табл. 4.3), отриманих на заключному етапі ДА [19, 48].

Таблиця 4.3 – Рівняння функцій класифікації (фрагмент)

Виявлення впливу сезонності
$h_{Q1} = 2,76 + 2,42 \cdot x_1 + 0,21 \cdot x_5 + 1,15 \cdot x_7 + 0,85 \cdot x_{11};$ $h_{Q2} = 3,55 + 0,69 \cdot x_1 + 2,36 \cdot x_5 + 1,48 \cdot x_7 + 0,68 \cdot x_{11};$ $h_{Q3} = 3,37 + 3,74 \cdot x_1 + 1,15 \cdot x_5 + 0,83 \cdot x_7 + 0,14 \cdot x_{11};$ $h_{Q4} = 1,41 + 1,53 \cdot x_1 + 0,62 \cdot x_5 - 5,27 \cdot x_7 + 3,48 \cdot x_{11}.$
Виявлення впливу соціальних чинників – ознаки дня (для сезону «Зима»)
$h_{\text{Кдн.1}} = 1,23 + 0,78 \cdot x_{13} + 0,67 \cdot x_{16} + 0,82 \cdot x_{18} + 0,75 \cdot x_{21} + 0,65 \cdot x_{22};$ $h_{\text{Кдн.2}} = 3,12 + 0,76 \cdot x_{13} + 0,65 \cdot x_{16} + 1,31 \cdot x_{18} + 0,55 \cdot x_{21} + 1,98 \cdot x_{22};$ $h_{\text{Кдн.3}} = 1,22 - 1,28 \cdot x_{13} - 1,44 \cdot x_{16} + 5,31 \cdot x_{18} - 3,48 \cdot x_{21} + 0,34 \cdot x_{22}.$

Застосування ДА забезпечило уточнення результатів класифікації, отриманої методом К-середніх, та формування навчальних вибірок добових ГВВ за сезоном та типом дня. Це дозволяє перейти до побудови класифікатора, здатного до самоорганізації, який дозволить спростити процедуру визначення належності нових добових ГВВ до одного з типових класів.

4.3 Прогнозування належності добових графіків витрати води до типових класів на основі класифікатора, здатного до самоорганізації

4.3.1 Побудова моделі класифікатора графіків витрати води з мережі водопостачання методом групового урахування аргументів

З позицій загальної постановки задачі КА [292], має бути вирішене завдання, яке полягає у 1) конструюванні оптимального за заданою системою критеріїв ансамблю інформативних ознак та 2) одночасній побудові оптимальної за заданими критеріями кластеризації [296]. В роботах [297-300] розвивається ідея синтезу дискримінантної функції для поділу класів на основі даних навчальної та перевіркової вибірок і для визначення оптимального складу ознак дискримінантної функції замість покрокової процедури оптимізації набору ознак за критерієм Фішера застосовується принцип МГУА - мінімізації критерію зовнішнього доповнення. Цей критерій сконструйований на основі оцінки відстані Махаланобіса і використовується для оцінки близькості до класу [295].

Вважається, що наявна множина ознак (змінних) є достатньою для поділу класів [295, 301], тобто виконується гіпотеза про компактності класів $R_i \cap R_j = \emptyset$, де $R_i, R_j, i \neq j$ - області розміщення більшості об'єктів в просторі $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}^m$ вихідних ознак x_1, x_2, \dots, x_m . В якості вихідних задано множину спостережень (об'єктів) $d \in D$. Об'єкти d_1, d_2, \dots, d_n є вектор-рядками матриці даних $\mathbf{X} \in \mathfrak{R}^m$, $\dim \mathbf{X} = n \times m$, вектор-стовпці якої є змінні $x_i, i = 1, \dots, m$ (m - кількість вхідних змінних; n - кількість спостережень). Задані також вектори фіктивної змінної - виходу \check{y} , $\dim \check{y} = n \times 1$, елементи $\check{y}_i, i = \overline{1, n}$ якого задають для різних спостережень приналежність об'єктів d_1, d_2, \dots, d_n до класів $\{r_1, r_2, \dots, r_k\}, k = \overline{1, K}$ [301]. Передбачається, що $y_j \in \mathfrak{R}$ є сумою значень відомої функції $\check{y}(d_j), j = \overline{1, n}$ та невідомої випадкової величини ξ_i з нульовим математичним сподіванням і обмеженою дисперсією $\sigma^2 \leq \infty$, $y_i = \check{y}(d_i) + \xi_i$ [295, 301]. Шум ξ і функція $\check{y}(d)$ не залежать один від одного, $d \in \mathbf{X}^m$; де вектор $\xi = (\xi_1, \dots, \xi_n)^T, \dim \xi = n \times 1$.

Матриця вихідних даних має m вихідних змінних і n спостережень. Коли загальна кількість спостережень щодо числа класів невелика, використовується підхід «штучного» збільшення обсягу навчальної вибірки. Матриця ознак крім ознак, що спостерігаються, може містити їх нелінійні перетворення [301]. Передбачається, що функції перетворень $f_j(d) \in \Phi$, забезпечують перехід з простору ознак розмірності m в простір ознак розмірності $f_j(d): \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}$, де $\Phi = \{f_j(d)\}_{j=1, \overline{m}}$ - задана скінченна множина функцій перетворень $d \in \mathbf{X}^m$ [295, 301].

Завдання побудови вирішального правила в МГУА представляється як завдання індуктивної побудови моделі, що ускладнюється в процесі роботи алгоритму. Нехай моделі $y(d_j)$ лінійно залежать від змінних $f_j(x_i)$, $i = \overline{1, m}$, де $d_j \in \mathbb{R}$ - елементи вектор-рядка $d \in \mathbf{X}^m$. Шуканим за допомогою МГУА вирішальним правилом класифікації для завдання класифікації ГВВ буде залежність, що представляється у вигляді полінома Колмогорова-Габбора [295, 301]:

$$\check{y}(d) = \theta_0 + \sum_{i=1}^M \theta_i x_i + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \theta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M \theta_{ijk} x_i x_j x_k, \quad (4.18)$$

Функція $\check{y}(d)$ є нелінійною за вихідними змінними і лінійною за параметрами θ [295, 301]. Відшукується краща і загальна для всіх $d=1, \dots, n$ структура моделі класифікатора $\check{y}(d)$, яка на отриманих за навчальними вибірками параметрами Θ_M найбільш точно з точки зору зовнішнього критерію представить складові (4.14).

Як алгоритм синтезу моделей обрано нейронні мережі МГУА.

Пошук моделі класифікатора виконувався в таких класах: клас 1 – лінійна НМ; клас 2 - поліноміальна НМ першого порядку; клас 3 - поліноміальна НМ другого порядку.

Процедура побудови класифікатора передбачає два етапи (рис. 4.4): спочатку за сезоном, а потім за типом дня для кожного сезону. Результатом процедури є побудова класифікатора, який розділяє ГВВ на 4 класи за сезоном, та трьох класифікаторів для кожного сезону (клас нерегулярних днів не розглядається), який розділяє ГВВ на 3 класи за типом дня.



Рисунок 4.4 – Двоетапна процедура побудови класифікаторів

Для побудови класифікаторів використано програмну оболонку GMDH Shell DS 3.8.8 [282]. Алгоритм класифікації GMDH Shell використовує метод «один проти всіх» (One-vs-All). Це дає змогу звести багатокласову класифікацію до бінарної класифікації. Для заданої навчальної вибірки будується K бінарних класифікаторів (за кількістю класів), кожен з яких відокремлює один з класів від всіх інших [302]. Кожен клас a_j зіставляється з іншими $(k-1)$ класами, тобто в кожному з j випадків вибір здійснюється з двох варіантів: «клас a_j » і «не клас a_j ». One-vs-All метод полягає в навчанні K класифікаторів за принципом [303]:

$$f_i(x) = \begin{cases} \geq 0, & \text{якщо } y(x) = i \\ < 0, & \text{якщо } y(x) \neq i \end{cases} \quad (4.19)$$

які відокремлюють кожен клас від інших. Для кожного $x \in X$ обчислюються всі класифікатори. Кожен класифікатор навчається на тренувальній вибірці виду:

$$\{(x, 1) | y = i, (x, y) \in S\} \cup \{(x, -1) | y \neq i, (x, y) \in S\}, i = 1, k, \quad (4.20)$$

де i – порядковий номер бінарного класифікатора

Кожен з бінарних класифікаторів через точність, вірогідність тощо визначає ступінь довіри до заданого класу (що прецедент належить класу k). Підсумкове рішення по всіх класах приймається за схемою «переможець забирає все» - переможцем вважається клас, який має максимальне значення функції F . Класифікація довільного вектору ознак $X \in \mathfrak{R}^m$ визначається голосуванням [303]:

$$F(x) = \arg \max_{i=1, \dots, N} f_i(x) \quad (4.21)$$

Тобто, вибирається клас, що забезпечує найбільший ступінь впевненості.

Щоб уникнути проблеми перенавчання (коли модель добре працює на тестових прикладах, але погано на реальних даних), для перевірки моделі застосовано стратегію перехресної перевірки по K -блоках [284] (вся навчальна вибірка ділиться на k -частин, потім алгоритм класифікації навчається на всій навчальній вибірці, крім частини i , після чого, тестується на i -й частині).

Для оцінки якості класифікації використовуються метрики: точність, повнота, метрика Ван Різбергена (F-міра) [295]. Точність і повнота не залежать від співвідношення розмірів класів і коректно відображають якість роботи алгоритму. Чим вища точність і повнота, тим краща якість класифікатора. F-міра являє собою гармонічне середнє між точністю та повнотою і є формальною метрикою оцінки якості класифікатора. Оцінка F досягає найкращого значення, що означає досконалий точність і чутливість, при значенні 1 і прагне до нуля, якщо точність або повнота прагне до нуля. Оцінка F може забезпечити більш реалістичну оцінку продуктивності тесту, використовуючи як точність, так і повноту.

Для аналізу правильно (чітко) визначених результатів використана метрика акуратність - опис систематичних помилок, показник статистичного упередження. Акуратність використовується як статистичний показник того, наскільки добре тест бінарної класифікації правильно визначає або виключає стан.

Разом з часткою правильних відповідей обчислюють базовий рівень - частку правильних відповідей алгоритму, що завжди видає найбільш потужний клас.

Результати верифікації моделей-класифікаторів різного типу за сезоном для навчальної та перевіркової вибірки відображені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Результати верифікації класифікатора за сезоном

Клас моделі	Навчальна вибірка			Екзаменаційна вибірка			Критерій регулярності
	Вірно класифікованих	Невірно класифікованих	Зважена F-міра	Вірно класифікованих	Невірно класифікованих	Зважена F-міра	
1	246 (84,5%)	45 (15,5%)	0,839	63 (86,3%)	10 (13,7%)	0,858	0,03
2	266 (91,4%)	25 (8,9%)	0,913	66 (90,4%)	7 (9,6%)	0,906	0,0021
3	277 (95,2%)	14 (4,8%)	0,952	69 (94,5%)	4 (5,5%)	0,945	0,002

За результатами випробувань вибрано модель-класифікатора, що забезпечує кращі характеристики результатів класифікації за критерієм регулярності. Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати: кращі результати забезпечує поліноміальна МГУАНМ другого порядку:

$$Y = -0,025 + x_{11} \cdot 0,051 + N_2 \cdot 1,095 \quad (4.22)$$

де

$$\begin{aligned} N_2 &= 0,042 - x_5 \cdot 0,094 + N_4 \cdot 0,841 \\ N_4 &= 0,0213 - x_1 \cdot 0,453 - x_1 \cdot x_7 \cdot 0,248 + x_1^2 \cdot 0,117 + x_7 \cdot 0,277 + x_7^2 \cdot 0,081 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Ефективність роботи моделі-класифікатора за сезоном характеризує матриця класифікації для навчальної та перевірконої вибірки (табл. 4.5). Результати верифікації класифікатора свідчать про достатньо високу якість класифікації.

Таблиця 4.5 - Матриця класифікації класифікатора за сезоном

Фактична належність до класу	Навчальна вибірка						Екзаменаційна вибірка					
	Класифіковано як					Повнота	Класифіковано як					Повнота
	1	2	3	4	Разом		1	2	3	4	Разом	
1	74	4	0	0	78	0,949	16	0	0	0	16	1
2	3	115	0	0	118	0,975	1	36	0	0	36	0,972
3	0	0	42	0	42	1	1	0	7	0	8	0,875
4	0	4	3	46	52	0,868	0	2	0	11	13	0,846
Разом	77	123	45	46	291		18	37	7	11	73	
Точність	0,961	0,935	0,933	1			0,889	0,946	1	1		
F-міра	0,955	0,954	0,966	0,929	0,952		0,941	0,959	0,933	0,917	0,945	
Базовий рівень	0,732	0,595	0,856	0,818	0,405		0,781	0,507	0,89	0,822	0,493	
Правильність	0,976	0,962	0,99	0,976	0,952		0,973	0,959	0,986	0,973	0,945	

Значимість змінних моделі (табл. 4.6) визначається за ступенем їх впливу на середньоквадратичне відхилення моделі згідно (3.22). Оскільки змінна в моделі множиться на іншу змінну, а також підноситься до квадрату, то є прийнятним, що вплив перевищує 100%.

Аналогічним чином виконано побудову класифікаторів за типом дня для кожного сезону [59]. Результати верифікації моделей-класифікаторів за типом дня для навчальної та перевірконої вибірки відображені в табл. 4.7. Результати вибору моделей-класифікаторів та значимості змінних наведено в табл. 4.8. Характеристики результатів ефективності їх роботи наведено в табл. 4.9.

Таблиця 4.6 - Значимість змінних моделі класифікатора за сезоном

Змінна	RMSE моделі за тестом важливості (R_{var})	Значимість змінних, Impact, %
X_1	0,574	162,5
X_7	0,5	126,5
X_5	0,265	30,21
X_{11}	0,246	11,64

Таблиця 4.7 – Результати верифікації класифікаторів за типом дня

Сезон	Клас моделі	Навчальна вибірка			Екзаменаційна вибірка			Критерій регулярності
		Вірно класифікованих	Невірно класифікованих	Зважена F-міра	Вірно класифікованих	Невірно класифікованих	Зважена F-міра	
Зима	1	133 (96,4%)	5 (3,6%)	0,964	32 (94,1%)	2 (5,9%)	0,941	0,032
	2	132 (95,8%)	6 (4,3%)	0,956	32 (94,1%)	2 (5,9%)	0,939	0,028
	3	135 (97,8%)	3 (2,2%)	0,978	32 (94,1%)	2 (5,9%)	0,942	0,022
Весна-літо-осінь	1	105 (90,5%)	11 (9,5%)	0,901	24 (82,8%)	5 (17,2%)	0,795	0,027
	2	111 (97,4%)	5 (4,3%)	0,956	27 (93,1%)	2 (6,9%)	0,924	0,024
	3	113 (97,4%)	3 (2,6%)	0,974	28 (96,6%)	1 (3,4%)	0,964	0,019
Літо	1	32 (100%)	0 (0%)	1	8 (100%)	0 (0%)	1	0,0084
	2	32 (100%)	0 (0%)	1	8 (100%)	0 (0%)	1	0,002
	3	32 (100%)	0 (0%)	1	8 (100%)	0 (0%)	1	0,0000021

Таблиця 4.8 – Характеристика моделей-класифікаторів за типом дня

Сезон	Модель	RMSE моделі за тестом важливості (R_{var}) / Значимість змінних (Impact, %)				
		X_{13}	X_{16}	X_{18}	X_{21}	X_{22}
Зима	$Y = -0,004 - 0,032 \cdot x_{18} + 1,0075 \cdot N_2$ $N_2 = 0,016 + 0,158 \cdot x_{21} \cdot N_3 -$ $-0,0046 \cdot x_{21}^2 + 0,956 \cdot N_3$ $N_3 = -0,092 - 1,674 \cdot N_8 -$ $2,88 \cdot N_8 \cdot N_5 + 2,666 \cdot N_8^2 + 3,013 \cdot N_5$ $N_5 = 0,0519 + 0,064 \cdot x_{13} + 0,148 \cdot x_{13} \cdot N_8 +$ $+0,846 \cdot N_8$ $N_8 = 0,677 + 0,152 \cdot x_{16} - 0,124 \cdot x_{16}^2 +$ $+0,286 \cdot x_{22}$	0,263/0,75	0,325/26,27	0,345/34,32	0,273/4,81	0,312/20,89
Весна-літо-осінь	$Y = -0,0078 + 0,027 \cdot x_{22} + 1,037 \cdot N_2$ $N_2 = -0,0092 + 0,037 \cdot x_{16} + 1,01 \cdot N_3$ $N_3 = 0,0103 - 0,063 \cdot x_{18} + 0,962 \cdot N_5$ $N_5 = 0,052 + 0,171 \cdot x_{21} - 0,303 \cdot x_{21} \cdot x_{13} +$ $+0,141 \cdot x_{21}^2 - 0,351 \cdot x_{13} + 0,251 \cdot x_{13}^2$	0,22/10,67	0,488/128,2	0,52/134	0,215/8,38	0,22/10,67
Літо	$Y = -0,003 + 0,0085 \cdot x_{22} + 1,013 \cdot N_3$ $N_3 = 0,0026 + 0,0178 \cdot x_{16} + 0,977 \cdot N_6$ $N_6 = -0,014 + 0,708 \cdot N_{14} + 0,381 \cdot N_{15}$ $N_{15} = -0,027 + 0,097 \cdot x_{18} + 0,13 \cdot x_{18} \cdot x_{13} +$ $+0,157 \cdot x_{18}^2 + 0,075 \cdot x_{13}$ $N_{14} = 0,148 - 0,021 \cdot x_{21} - 0,341 \cdot x_{21}^2$	0,11/9,66	0,08/5,97	0,25/61,14	0,143/21,9	0,08/4,14

Таблиця 4.9 - Матриця класифікації класифікаторів за типом дня

Сезон	Фактична належність до класу	Класифіковано як				Повнота	Класифіковано як				Повнота
		1	2	3	Разом		1	2	3	Разом	
Зима	1	75	2	0	77	0,974	18	2	0	20	0,9
	2	1	43	0	44	0,977	0	11	0	11	1
	3	0	0	17	17	1	0	0	3	3	1
	Разом	76	45	17	138		18	13	3	34	
	Точність	0,987	0,956	1			1	0,846	1		
	F-міра	0,98	0,966	1	0,978		0,947	0,917	1	0,942	
	Базовий рівень	0,558	0,681	0,877	0,558		0,588	0,676	0,912	0,588	
	Правильність	0,978	0,978	1	0,978		0,941	0,941	1	0,941	
Весна-літо-осінь	1	23	1	0	24	0,958	5	0	0	5	1
	2	1	74	0	75	0,987	0	19	0	19	1
	3	0	1	16	17	0,941	0	1	4	5	0,8
	Разом	24	76	16			5	20	4	29	
	Точність	0,958	0,974	1			1	0,95	1		
	F-міра	0,958	0,98	0,97	0,974		1	0,974	0,889	0,964	
	Базовий рівень	0,793	0,647	0,853	0,647		0,828	0,655	0,828	0,655	
	Правильність	0,983	0,974	0,991	0,974		1	0,966	0,966	0,966	
Літо	1	5	0	0	5	1	1	0	0	1	1
	2	0	15	0	15	1	0	6	0	6	1
	3	0	0	12	12	1	0	0	1	1	1
	Разом	5	15	12	32		1	6	1	8	
	Точність	1	1	1			1	1	1		
	F-міра	1	1	1	1		1	1	1	1	
	Базовий рівень	0,844	0,531	0,625	0,469		0,875	0,75	0,875	0,75	
	Правильність	1	1	1	1		1	1	1	1	

Результати верифікації класифікаторів за типом дня, побудованих для кожного сезону, свідчать про достатньо високу якість класифікації.

Запропонований підхід до класифікації добових ГВВ базується на побудові класифікаторів в просторі параметрів найкращої структури моделей об'єктів класифікації, що дає змогу перевести задачу в багатомірний простір, де кожен добовий ГВВ представлено точкою в просторі параметрів своєї моделі.

4.3.2 Алгоритм віднесення ГВВ до типових класів

Призначенням запропонованої процедури класифікації добових графіків витрати води мережі водопостачання є прогнозування імовірності належності добового ГВВ до одного з типових класів [47, 80]. Побудовані класифікатори забезпе-

чують можливість ідентифікації належності нових спостережень ГВВ до одного з класів (рис. 4.5).

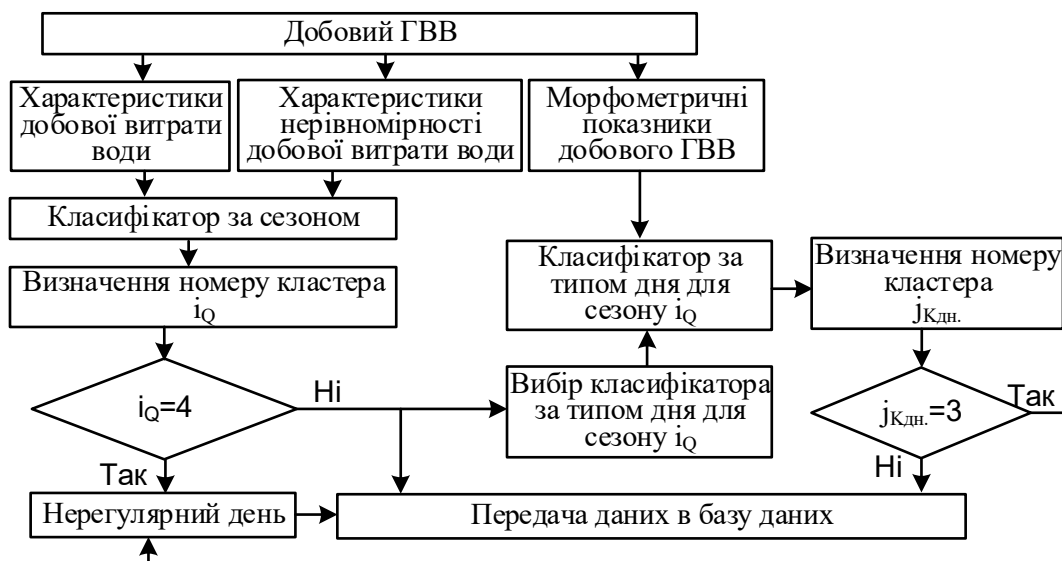


Рисунок 4.5 – Алгоритм ідентифікації належності ГВВ до типових кластерів

Процедура ідентифікації здійснюється у два етапи [19, 47, 80]: спочатку перевіряється приналежність ГВВ до відповідного кластеру за сезоном; за умови не відповідності ГВВ класу нерегулярних днів здійснюється процедура ідентифікації приналежності ГВВ до одного з класів за типом дня. Перевірка умови не належності ГВВ до класу нерегулярних днів зумовлена необхідністю коректного формування БРЕ та подальшого контролю електроспоживання.

4.4 Формалізований опис циклічних змін добової витрати води з мережі водопостачання

Формування однотипних груп добових ГВВ забезпечує можливість формування вибірок ретроспективних даних, необхідних для формалізованого опису циклічних змін процесу водоподачі з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників (рис. 4.6), який передбачає визначення усереднених значень добових характеристик водоподачі (значення добової ВВ, її складових, інших технологічних параметрів) та меж їх зміни для кожного з утворених кластерів [19, 44, 57, 86, 87].

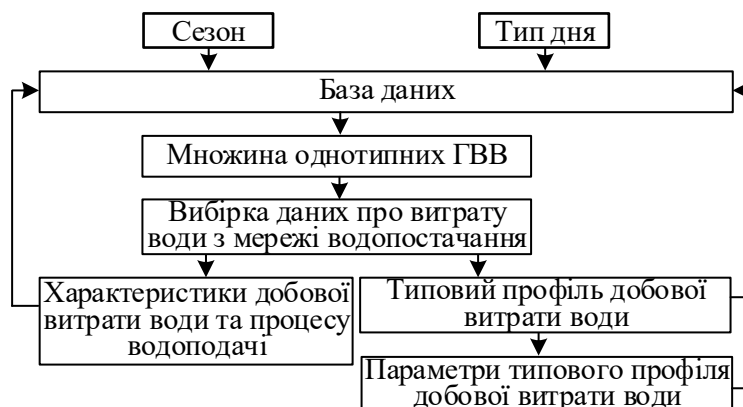


Рисунок 4.6 – Процедура формалізованого опису режиму водоподачі.

Усередненим значенням будь-якої характеристики водоподачі є вибіркове математичне сподівання її значень, утворених об'єктами певного кластеру:

$$\bar{P} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m P_j, \quad (4.24)$$

де m – кількість об'єктів в кластері;

P_j - значення характеристики добової ВВ з мережі водопостачання для j -го дня.

В припущенні невідомої дисперсії інтервальна оцінка вибіркового математичного сподівання (довірчий інтервал) [289, 304]:

$$\bar{P} - \frac{s}{\sqrt{m}} t_{\left[1-\frac{\alpha}{2}, (m-1)\right]} < \bar{P} < \bar{P} + \frac{s}{\sqrt{m}} t_{\left[1-\frac{\alpha}{2}, (m-1)\right]}, \quad (4.25)$$

де $t_{\left[1-\frac{\alpha}{2}, (m-1)\right]}$ - квантиль розподілу Стюдента для заданої довірчої імовірності $(1-$

$\alpha)$ з $(m-1)$ ступенями вільності;

α - рівень значущості, визначає ймовірність допущення помилок $\alpha=1-p$;

s – вибіркове середньоквадратичне відхилення:

$$s^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^m (P_j - \bar{P})^2 \quad (4.26)$$

Побудований з довірчою імовірністю $p=0,997$ довірчий інтервал приймаємо в якості допустимих меж зміни характеристики водоподачі $[P_{\min}, P_{\max}]$.

Фактичний добовий ГВВ являє собою деякий діапазон значень в полі координат Q-t, який обмежений кривими максимального і мінімального водоспоживання

[15]. Аналіз однотипних добових ГВВ забезпечує можливість формування усереднених добових ГВВ для отриманих типових класів (профілів для типових днів) [19, 57]. Для цього процедуру визначення усереднених характеристик добової ВВ необхідно застосувати до отриманих наборів погодинних значень ВВ з мережі водопостачання [19]. Результатом її застосування є отримання щогодинних усереднених значень добової ВВ та меж її зміни, тобто наборів добових ГВВ для типових днів кожного сезону, що відповідають середній добовій ВВ (профіль «середній»), максимально та мінімально очікуваній (відповідно, профіль «максимальний» та «мінімальний»). Набір отриманих ГВВ формує типовий профіль добового ГВВ для типового дня і є основою для планування режиму водоподачі та ефективної роботи НС. Визначення морфометричних параметрів кожного з профілів добового ГВВ дає змогу виконати усереднений опис його форми, тобто, визначити усереднені значення параметрів та межі їх зміни.

На основі даних про добову ВВ з мережі водопостачання водозабору «Дубнівський» КП «Луцькводоканал» із застосування запропонованого підходу виконано формалізований опис циклічних змін процесу водоподачі з урахуванням виявленого впливу сезонних та соціальних чинників, зокрема: визначено усереднені характеристики добової ВВ для кожного сезону; типових профілів добових ГВВ та їх параметрів для типових днів кожного сезону (Додаток Д).

Слід зазначити, що аналіз подібних профілів добових ГВВ виявив, що середньодобове значення ВВ з мережі водопостачання мало відрізняється для робочих та вихідних днів в межах кожного сезону. Проте форма профілів є відмінною і характеризується зміщенням максимумів профіля добового ГВВ вихідного дня у порівнянні із профілем робочого дня. Крім того, у вихідні дні профіль добового ГВВ характеризується меншою нерівномірністю, ніж у робочі. Це підтверджує аналіз форми типових профілів добового ГВВ для робочих та вихідних днів кожного сезону та результатів опису їх форми.

Зважаючи на отримані результати необхідним є уточнення складових добової ВВ з урахуванням типу дня. З цією метою повторно застосовано процедуру факторного аналізу окремо для добових ГВВ робочих та вихідних днів. Результа-

том її застосування є уточнення рівнянь відповідних складових добової ВВ для типових днів (табл. 4.10).

Таблиця 4.10 – Рівняння складових добової ВВ типових днів

Інтерпретація складових добової витрати води	Тип дня	
	Робочий	вихідний
у нічний період доби	$Q_1 = \sum_{j=1}^6 Q(t_j)$	$Q_1 = \sum_{j=1}^6 Q(t_j)$
у денний період доби	$Q_2 = \sum_{j=8}^{22} Q(t_j)$	$Q_2 = \sum_{j=9}^{22} Q(t_j)$
у проміжний період доби	$Q_3 = \sum_{j=(7,23,24)} Q(t_j)$	$Q_3 = \sum_{j=(7,8,23,24)} Q(t_j)$

Отримані результати є основою урахування циклічних змін процесу водоподачі під час формування БРЕ (процедуру визначення БРЕ розглянуто в розділі 3), а також одним з елементів процедури контролю ефективності електроспоживання для врахування фактичних умов роботи об'єкту водопостачання та налаштування інструментів сигналізації (що розглядається в розділі 5).

Організація моніторингу ефективності роботи об'єктів водопостачання на постійній основі сприятиме уточненню профілів добового ГВВ для типового дня та їх параметрів.

4.5 Коригування характеристик добової витрати води з мережі водопостачання з урахуванням впливу кліматичних та соціальних чинників

4.5.1 Визначення прогнозного значення добової витрати води

Визначення достовірного значення добової ВВ з мережі водопостачання є одним з етапів планування водоподачі. Витрата води - величина випадкова, багатofакторна, достовірний прогноз якої визначає раціональні енергоефективні режими роботи насосного обладнання [195]. Під час розрахунку водоспоживання небезпечно як завищення, так і заниження витрат: перше призведе до приховування втрат води (витоків, нераціональних витрат, зливів), друге - до перебоїв в подачі води і порушення гідравлічного режиму [195].

Виявлення циклічних змін у характері ВВ з мережі водопостачання та формалізований опис водоподачі для типових за сезоном умов роботи дозволяє лише усереднено врахувати вплив кліматичних чинників. Дослідження [195, 198] підтверджують вплив аномальних температур зовнішнього повітря на ВВ. Отже, постає задача коригування значень характеристик добової ВВ, тобто, прогнозування ВВ з урахуванням кліматичних чинників. Це потребує побудови відповідних математичних моделей, які б забезпечили врахування тенденції зміни самого процесу ВВ, вплив чинників зовнішнього середовища і достатню точність прогнозу ВВ.

Математична постановка задачі прогнозування ВВ з мережі водопостачання матиме таке формулювання. Нехай значення вихідного часового ряду ВВ q_t доступні в дискретні моменти часу $t = 1, 2, \dots, n$. Передбачається, що на значення q_t впливає набір зовнішніх чинників: x_1 - середньодобове значення температури $\theta_{\text{сер}}$; x_2 - максимальне значення добової температури θ_{max} ; x_3 - мінімальне значення температури θ_{min} ; x_4 - кількість опадів RR ; x_5 - вологість UU . Кожен з зовнішніх чинників є доступним у відповідні моменти часу $t_i = 1, 2, \dots, n_i$. Причому, дискретність вихідного часового ряду q_t і часових рядів зовнішніх чинників x_{it} , а також значення n та n_i однакові. Необхідно визначити майбутні значення ВВ з мережі водопостачання q в моменти часу $t+1, \dots, t+p$, враховуючи вплив зовнішніх чинників x_i , значення яких в моменти часу $t+1, \dots, t+p$ є доступними.

Для обчислення прогнозних значень витрати води в зазначені моменти часу необхідно визначити функціональну залежність, яка відображатиме зв'язок між минулими $q_{t-\alpha}$ і майбутніми q_{t+p} значеннями процесу q , братиме до уваги вплив зовнішніх чинників x_{it} на вихідний часовий ряд, а також ступінь їх впливу.

Зважаючи на вибрану постановку задачі прогнозування, доцільним є використання моделі ВВ як динамічного процесу, що змінюється в часі та зазнає впливу також змінних в часі зовнішніх чинників x , тобто, моделі виду [268]:

$$q_t = \sum_{\alpha=1}^{LQ} a_{\alpha}^T q_{t-\alpha} + \sum_{v=1}^{LX} b_v^T x_{t-v+1} + \xi_t \quad (4.27)$$

де LQ, LX - число минулих значень (лагів) для вихідних і вхідних змінних;

a_{α}, b_v - вектори невідомих параметрів;

ξ_t - випадкова складова, для якої середнє абсолютне відхилення істинного значення від прогнозованого прагне до мінімального для заданого горизонту [305]:

$$\bar{E} = \frac{1}{P} \sum_{t=T+1}^{T+P} |\varepsilon_t| \rightarrow \min. \quad (4.28)$$

Причому, математичне сподівання $E(\varepsilon_t | y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}) = 0$ і ε_t має деяку кінцеву дисперсію σ^2 .

Модель (4.27) належить до класу авторегресійних моделей з зовнішніми входами, яка передбачає значення часового ряду, використовуючи минулі значення виходів, поточні і минулі значення входів, а також містить елемент зсуву, який дозволяє компенсувати статичну адитивну помилку або шум.

Для вирішення завдання моделювання доцільним є застосування одного з алгоритмів МГУА, як засобу самоорганізації моделей складних процесів. На відміну від статистичних методів, яким необхідні якнайбільші та однорідні вибірки в алгоритмах МГУА це не вимагається, а розбиття на підвибірки використовується для пошуку моделі із структурою та параметрами, оптимально підібраними за умовою мінімуму дисперсії шуму в ендогенній змінній [306]. МГУА дозволяє врахувати сезонність та тренд, володіє здатністю адаптивності, гнучкості, придатний для моделювання нелінійних процесів [306]. Особливістю застосування МГУА є те, що прогнозна модель представляється у вигляді суми двох моделей [306]:

- моделі тренду:

$$V_t = \theta^T \mathbf{f}(t) \quad (4.29)$$

θ - вектор параметрів; $\mathbf{f}(t)$ - вектор з різного набору функцій f_i :

- лінійної за параметрами моделі для залишків $\Delta_t = q_t - V_t$ з урахуванням ефекту автокореляції:

$$\Delta_{t+i} = \varphi(\boldsymbol{\eta}, \Delta_t, \Delta_{t-1}, \Delta_{t-2}, \Delta_{t-3}), \quad i = \overline{1, n} \quad (4.30)$$

Вектори θ і $\boldsymbol{\eta}$ - визначаються методом найменших квадратів похибок на навчальній підвибірці N_A , а структура вибирається за критерієм регулярності, що

обчислюється на перевірочній підвибірці N_B .

Формування груп подібних добових ГВВ забезпечує формування наборів ретроспективних даних часових рядів ВВ та кліматичних чинників для кожного типового сезону. Вибірки не містять нетипових даних щодо ВВ, зумовлених, наприклад, аварійними ситуаціями. Дані для вилючених з вибірки днів замінені значеннями для аналогічних днів тижня.

Для побудови моделей добової ВВ з мережі водопостачання використано програмну оболонку GMDH Shell DS 3.8.8 [282]. Як алгоритм синтезу моделей обрано МГУА-подібні нейронні мережі. Пошук оптимальної структури моделі виконувався в таких класах: клас 1 – лінійна НМ; клас 2 - поліноміальна НМ першого порядку; клас 3 - поліноміальна НМ другого порядку. На вхід алгоритму синтезу моделей подаються ретроспективні вибірки даних об'ємом n для добової витрати води q_t та m кліматичних чинників x_t . Результатом роботи алгоритму синтезу моделей є формування наборів моделей-кандидатів, кожна з яких є оптимальною в заданому класі опорних функцій (рис. 4.8). Вибір кращої структури математичної моделі добової ВВ передбачає застосування багатокритеріального вибору моделі. Результатом застосування процедури моделювання є прогнозне значення добової ВВ.

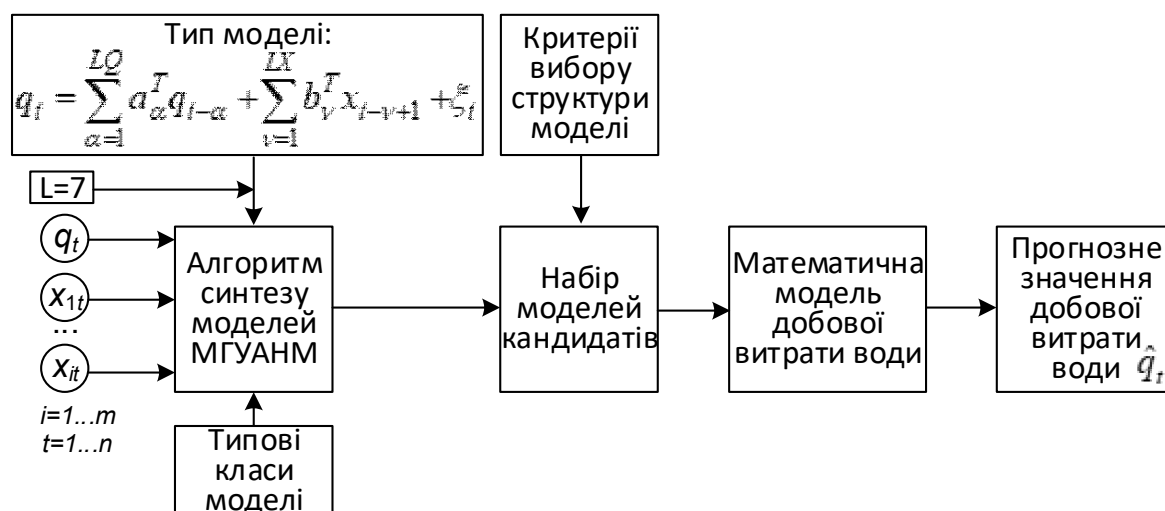


Рисунок 4.8 – Побудова математичної моделі добової витрати води

Під час моделювання враховано тижневу циклічність ВВ з мережі водопостачання. Для перевірки якості моделі використано процедуру перехресної пере-

вірки по К-блоках. Для оцінки якості прогнозу з вхідних експериментальних даних, крім навчальної і перевіркової вибірок, виділено екзаменаційну вибірку N_C , на якій визначено похибку прогнозу $\Delta^2(C)$ – відносне середньоквадратичне відхилення обчисленого за моделлю прогнозного значення \hat{y}_i і дійсного значення y_i [265, 281]. У результаті використання МГУА отримано модель оптимальної складності для кожного класу опорних функцій, до яких застосовано процедуру багатокритеріального вибору кращої моделі, запропоновану в [20, 56, 82] та описану в розділі 3. На основі багатокритеріального аналізу адекватності моделей та похибки прогнозу з наборів моделей-кандидатів відібрано кращі математичні моделі добової ВВ з мережі водопостачання для кожного сезону (табл. 4.11)

Таблиця 4.11 - Математичні моделі витрати води з мережі водопостачання

Номер кластеру за сезоном	Математична модель	$\Delta^2(C)$
1 (Літо)	$Q(t) = -213,26 + 7,9 \cdot Q[t-7] + 0,9 \cdot N5(t) - 0,05 \cdot Q[t-7] \cdot N5(t) + 0,4 \cdot N8(t) - 0,001 \cdot N6(t) \cdot N8(t)$ $N5(t) = 286,46 + 8,17 \cdot Q[t-7] + 0,57 \cdot Q[t-7] \cdot \theta_{\max} + 55,9 \cdot (Q[t-7])^{(1/3)}$ $N5(t) = 174,92 + 0,37 \cdot \theta_{\text{cep}} + 2,16 \cdot Q[t-7] \cdot \theta_{\text{cep}} + 1,9 \cdot \theta_{\max} \cdot (Q[t-7])^{(1/3)}$	0,011
2 (Зима)	$Q(t) = 290,15 + 37,9 \cdot Q[t-7] + 0,76 \cdot N3(t) - 0,04 \cdot Q[t-7] \cdot N3(t)$ $N3(t) = 415,21 + 10,19 \cdot Q[t-7] - 0,0015 \cdot \theta_{\text{cep}} + 0,002 \cdot \theta_{\max} + 7,9 \cdot (Q[t-7])^{(1/3)}$	0,004
3 (Весна-літо-осінь)	$Q(t) = 185,4 + 27,9 \cdot Q[t-7] + 5,13 \cdot N6(t) \cdot N8(t) - 0,02 \cdot N6(t) - 1,54 \cdot N8(t)$ $N6(t) = 915,57 + 87,9 \cdot Q[t-7] - 0,41 \cdot Q[t-7] \cdot \theta_{\max} - 6,37 \cdot Q[t-7] \cdot \theta_{\text{cep}} + 0,08 \cdot (Q[t-7])^{(1/3)}$ $N8(t) = -237,5 + 19,5 \cdot Q[t-7] - 0,64 \cdot \theta_{\text{cep}} + 0,6 \cdot \theta_{\text{cep}} \cdot \theta_{\max} - 0,017 \cdot RR + 5,6 \cdot \theta_{\max}$	0,006

Аналіз отриманих моделей з урахуванням значимості впливу змінних за ступенем їх впливу на середньоквадратичне відхилення моделі, визначеної згідно (3.21), дозволяє стверджувати: для сезону «зима» вплив кліматичних чинників на ВВ з мережі водопостачання практично відсутній. В інші сезони істотним чинником є температура повітря.

4.5.2 Побудова прогнозного профілю добового графіка витрати води

Задача прогнозування добового ГВВ полягає в тому, щоб на основі спостережень за процесом побудувати прогноз щодо майбутньої його поведінки, тобто, визначити значення погодинної витрати води на добу вперед. Зважаючи на отри-

мані результати аналізу впливу кліматичних чинників на ВВ з мережі водопостачання в різні сезони, маємо дві постановки задачі: 1) для сезону зима - прогнозування ВВ як часового ряду без урахування зовнішніх чинників; 2) інші сезони - прогнозування ВВ як часового ряду з урахуванням впливу зовнішніх чинників. Друга задача аналогічна задачі прогнозування добової ВВ. Відмінність полягає у довжині лагу, який враховує тривалість доби та довжину інтервалу випередження прогнозу. Для першої задачі мають місце деякі відмінності.

Нехай в послідовні моменти часу $\{t_1, \dots, t_n\}$ спостережено значення $\{q_1, \dots, q_n\}$ ВВ з мережі водопостачання, яка є випадковою величиною. Отже, отримано часовий ряд $q(t_1), \dots, q(t_n)$. Необхідно побудувати прогноз процесу $Q(t)$ в моменти часу $t=T+p$ (де p - тривалість випередження: $p=1, \dots, 24$) на основі деякої функціональної залежності. Зважаючи на вибрану постановку задачі прогнозування, доцільним є використання авторегресійної моделі добового ГВВ як динамічного процесу, що змінюється в часі, тобто, моделі виду [268]:

$$q_t = \sum_{\alpha=1}^{LQ} a_{\alpha}^T q_{t-\alpha} + \xi_t. \quad (4.31)$$

Для побудови залежності (4.31) для зимового сезону та залежності (4.27) для інших сезонів вибрано МГУА.

Набори ретроспективних даних сформовано для кожного сезону з урахуванням типу дня. Як вхідні дані використано: для сезону «зима» - добові ГВВ; для інших сезонів – добові ГВВ та добові графіки температури повітря.

Для побудови прогнозних моделей добового ГВВ для типових днів відповідних сезонів використано програмну оболонку GMDH Shell DS 3.8.8 [282]. Як алгоритм синтезу моделей обрано МГУА-подібні нейронні мережі. Пошук оптимальної моделі виконувався в таких класах: клас 1 – лінійна НМ; клас 2 - поліноміальна НМ першого порядку; клас 3 - поліноміальна НМ другого порядку. У результаті роботи алгоритму отримано модель оптимальної складності для кожного класу опорних функцій, до яких застосовано процедуру багатокритеріального вибору кращої моделі. На основі багатокритеріального аналізу результатів перевірки якості моделі та похибки прогнозу $\Delta^2(C)$ з набору моделей-кандидатів вибрано

кращу модель для прогнозування профілю добового ГВВ для кожного типового дня кожного сезону (табл. 4.12).

Таблиця 4.12 - Математичні моделі профілю добового графіка витрати води з мережі водопостачання

Номер кластеру за сезоном	Номер кластеру за типом дня	Модель профілю добового ГВВ	$\Delta^2(C)$
1 (Літо)	1 - робочий	$Q(t)=157,9+1,31 \cdot N7(t)+0,02 \cdot N7(t) \cdot N8(t)-0,028 \cdot (N7(t))^2$ $N7(t)=515,57+15,95 \cdot Q[t-24]-0,57 \cdot Q[t-24] \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}-16,48 \cdot (Q[t-24])^{(2/3)}$ $N8(t)=-276,7-0,68 \cdot \theta[t-24]+0,81 \cdot \theta[t-24] \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}+51,6 \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}$	0,016
	2 - вихідний	$Q(t)=443,7-0,03 \cdot Q[t-24] \cdot N6(t)+0,01 \cdot (Q[t-24])^2-0,018 \cdot (N6(t))^2$ $N6(t)=-368,82+0,12 \cdot \theta[t-24]-3,64 \cdot (\theta[t-24])^2+1,77 \cdot Q[t-24]-0,002 \cdot (Q[t-24])^2$	0,019
2 (Зима)	1 - робочий	$Q(t)=458,36+0,26 \cdot N3(t) \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}-13,22 \cdot (Q[t-24])^{(2/3)}-0,02 \cdot (N3(t))^2$ $N3(t)=-4768,82+76,92 \cdot Q[t-24]-2,54 \cdot Q[t-24] \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}+0,008 \cdot (Q[t-24])^2+$ $+408,56 \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}-85,26 \cdot (Q[t-24])^{(2/3)}$	0,0046
	2 - вихідний	$Q(t)=-916,83+384,6 \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}+2,78 \cdot N4(t) \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}-38,9 \cdot (Q[t-24])^{(2/3)}-$ $-12,35 \cdot N4(t)-0,06 \cdot (N4(t))^2$ $N3(t)=603,61+29,03 \cdot Q[t-24]-1,74 \cdot Q[t-24] \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}+0,01 \cdot (Q[t-24])^2-$ $-418,8 \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}-35,41 \cdot (Q[t-24])^{(2/3)}$	0,0051
3 (Весна-літо-осінь)	1 - робочий	$Q(t)=-269,43+2,9 \cdot N5(t)+0,04 \cdot N5(t) \cdot N8(t)-0,02 \cdot (N5(t))^2-1,08 \cdot N8(t)-$ $-0,01 \cdot (N8(t))^2$ $N5(t)=-1118,4+19,25 \cdot Q[t-24]-7,57 \cdot Q[t-24] \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}+0,5 \cdot (Q[t-24])^2+$ $+843,4 \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}-192,5 \cdot (Q[t-24])^{(2/3)}$ $N8(t)=-214,5+0,14 \cdot \theta[t-24]+0,08 \cdot (\theta[t-24])^2+341,5 \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}$	0,0078
	2 - вихідний	$Q(t)=260,11-0,02 \cdot Q[t-24] \cdot N8(t)+0,09 \cdot (Q[t-24])^2+0,11 \cdot N8(t)+0,02 \cdot (N8(t))^2$ $N8(t)=-195,67+0,21 \cdot \theta[t-24]+0,42 \cdot \theta[t-24] \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}-0,03 \cdot (\theta[t-24])^2+$ $+328,8 \cdot (Q[t-24])^{(1/3)}$	0,0086

Результатом застосування отриманих моделей є визначення прогнозних значень ВВ з мережі водопостачання для кожної i -тої години доби, які утворюють прогнозний профіль добового ГВВ для відповідного сезону та типу дня (приклад результатів прогнозування наведено на рис. 4.9).

Побудова прогнозного профілю добового ГВВ дає змогу визначити прогнозні значення складових добової витрати води з мережі водопостачання для типового дня відповідного сезону, а його опис – прогнозні значення показників нерівномірності та морфометричних параметрів. Отримані значення є основою коригування БРЕ з урахуванням кліматичних чинників (відповідно до п. 5.3)

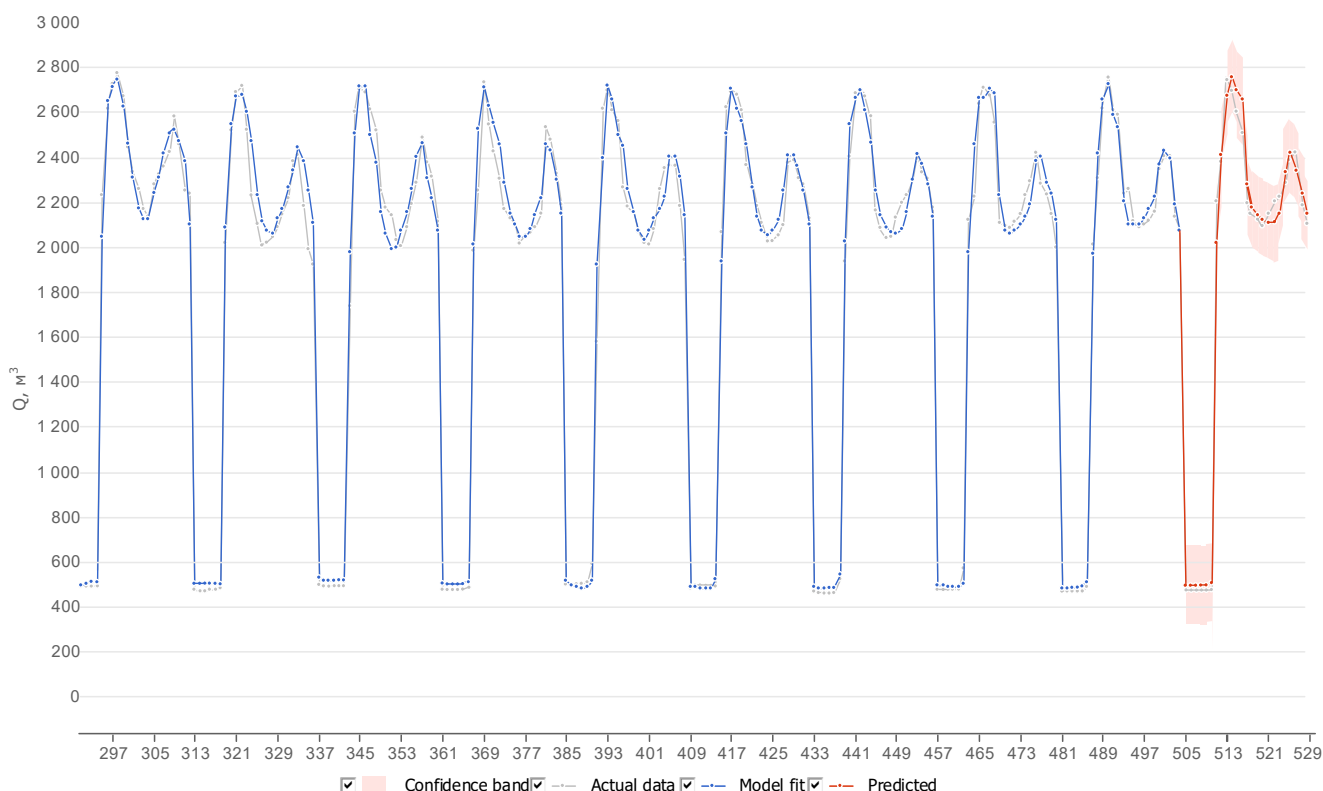


Рисунок 4.9 – Фрагмент результатів прогнозування профілю добового ГВВ (для робочого дня сезону «зима»)

4.6 Висновки до розділу

1. Основним режимним показником процесу водопостачання є добовий ГВВ. Виконаний аналіз добових ГВВ дозволяє стверджувати, що витрата води з мережі водопостачання володіє властивістю сезонності, а форма її добових графіків має циклічний характер. Забезпечення ефективної організації технологічного процесу водопостачання потребує моніторингу циклічних змін процесу водоподачі, зумовлених впливом соціальних, кліматичних та сезонних чинників, як складової системи моніторингу ефективності електроспоживання в СКВ.

2. Створення бази даних, яка містить добові ГВВ, характеристики добової витрати води, нерівномірності та форми її графіка є основою комплексного аналізу добових ГВВ та виявлення закономірностей у їх формуванні для відображення впливу сезонних і соціальних чинників на циклічні зміни процесу водоподачі, що розглядається як задача виявлення типових класів подібних добових ГВВ. Форму-

вання наборів класифікаційних ознак передбачає врахування особливостей впливу зовнішніх чинників на витрату води з мережі водопостачання, зокрема, характеристика добового ГВВ саме за об'ємами води використано для виявлення впливу сезонності, а його форми – для виявлення впливу соціальних чинників. Це є основою виконання процедури класифікації у два етапи: 1) за впливом сезонності; 2) за впливом соціальних чинників (типом дня) з урахуванням результатів першого етапу.

3. Запропонована процедура класифікації добових ГВВ передбачає послідовне застосування методів КА та ДА, що забезпечує формування інформаційної бази знань, та зважаючи на можливість утворення класів з малою кількістю об'єктів, побудову на її основі класифікаторів, здатних до самоорганізації, синтез моделей яких виконано із застосуванням МГУАНМ, що забезпечило автоматичну структурно-параметричну ідентифікацію моделей класифікаторів та достатньо високу якість класифікації ГВВ. Застосування запропонованої процедури забезпечує вирішення не лише задачі формування груп подібних добових ГВВ, а й ідентифікації належності нового спостереженого добового ГВВ до одного з типових класів спочатку за сезоном, а потім за типом дня за умови, що ГВВ не належить до класу нерегулярних за сезоном. Перевірка умови не належності ГВВ до класу нерегулярних днів зумовлена необхідністю коректного формування БРЕ та контролю електроспоживання.

4. Класифікація добових ГВВ та формування їх однотипних груп є основою формалізованого опису циклічних змін режиму водоподачі з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників, який передбачає визначення усереднених значень характеристик добової витрати води (значення добової витрати, її складових), інших технологічних параметрів та меж їх зміни для кожного з утворених кластерів, а також побудову типових профілів добових ГВВ для типових днів кожного сезону та визначення їх параметрів, що дає змогу визначити планові значення характеристик водоподачі під час планування електроспоживання.

5. Для врахування нетипового впливу кліматичних чинників (наприклад, аномальних температур) на характер витрати води з мережі водопостачання вини-

кає потреба коригування значення добової витрати води та профілю її добового ГВВ, тобто, прогнозування значення добової витрати води та її добового графіка з урахуванням тенденцій зміни самої витрати води та впливу кліматичних чинників. Застосування МГУАНМ як алгоритму синтезу моделей забезпечило автоматичну структурно-параметричну ідентифікацію математичних моделей, які забезпечують достатню точність прогнозу добової витрати води та профіля її добового графіка, що дає змогу коригувати планові значення характеристик водоподачі для коригування БРЕ.

6. Аналіз значимості впливу змінних побудованих математичних моделей добової витрати води дозволяє стверджувати: в зимовий період вплив кліматичних чинників на витрату води з мережі водопостачання практично відсутній. В інші сезони істотним чинником є температура повітря. Побудова прогнозного профілю добового ГВВ дає змогу визначити прогнозні значення складових добової витрати води з мережі водопостачання для типового дня відповідного сезону, а його опис – прогнозні значень показників нерівномірності та морфометричних параметрів.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА ТА АДАПТАЦІЯ ЙОГО ПРОЦЕДУРИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ БЕНЧМАРКІНГУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА МОНІТОРИНГУ ВОДОПОДАЧІ

5.1 Завдання контролю енергоефективності об'єктів водопостачання

У сучасній теорії управління контроль розглядається як елемент зворотного зв'язку [307], який надає енергоменеджеру повну інформацію про реальний стан справ та за допомогою якого проводиться прийняття та коригування управлінських рішень. З цієї позиції контроль є однією з функцій управління, що представляє собою самостійний, безперервний і систематичний процес управлінської діяльності, що виражається в спостереженні, перевірці, зборі та реєстрації інформації про ефективність функціонування керованого об'єкта і управлінських рішень, виявленні ступеня їх реалізації; своєчасному виявленню відхилень від прийнятих планів і нормативів, аналіз причин їх виникнення; коригуванні та координуванні функціонування об'єкта контролю, способів впливу на нього з метою не повторення помилок і відхилень [307]. Тобто, контроль як управлінський процес це система спостереження та перевірки фактичного стану і функціонування об'єкта контролю для оцінки обґрунтованості та ефективності прийнятих рішень, а також їх виконання [307]. Отже, основними етапами контролю є [58, 79]: 1) отримання первинної інформації про фактичний стан об'єкта контролю, його контрольовані показники; 2) отримання вторинної інформації - відхилень від заданих параметрів шляхом зіставлення первинної інформації з встановленими нормативами; 3) підготовка інформації для вироблення відповідних керуючих впливів.

Однією зі складових СЕМ є системи КіП (Monitoring and Targeting Systems) [145, 149, 166, 167], основним завданням яких є здійснення оперативного контролю ефективності енергоспоживання. За результатами контролю функціонування СТС системою КіП мають вироблятися спеціальні керуючі впливи на СТС для за-

безпечення ефективного енергоспоживання. Система КіП - це набір спеціальних процедур, що передбачають вимірювання енергоспоживання, реєстрацію та накопичення даних, що вимірюються, аналіз та звітування про споживання енергії [74, 75]. Їх призначення - оцінка потреб в енергії та висвітлення проблем, пов'язаних з енергоефективністю, виявлення причин та схем нераціонального споживання. Функціонування системи КіП передбачає [308, 165, 164]: облік фактичних обсягів енергоспоживання, результатів виробничої діяльності, а також чинників, що впливають на величину енергоспоживання на об'єкті контролю; визначення цільових змінних – нормативів для контрольованих параметрів; контроль виконання встановлених цільових змінних на основі їх порівняння з фактичними значеннями контрольованих параметрів; виявлення причин, що призводять до перевищення нормативних значень контрольованих параметрів; розробка і періодичне впровадження заходів з підвищення енергоефективності.

Система контролю енергоефективності повинна забезпечувати регулярне фіксування коливання електроспоживання, оцінку та контроль рівня енергоефективності, а також можливість виявлення на основі аналізу показників енергоефективності помилок в організації режиму роботи об'єктів, певних енергетичних аспектів та ділянок технологічного процесу, які потребують вдосконалення. Отже, контроль енергоефективності має бути комплексним та враховувати всі аспекти функціонування технологічної системи, а процедура контролю повинна давати змогу визначити моменти відхилення параметрів від запланованих значень та причини, через які відбулись ці відхилення [43, 55, 75]. Режим роботи будь-якого об'єкту, в тому числі, об'єктів СКВ, визначається потребами технологічного процесу, що характеризується певною циклічною мінливістю через вплив зовнішніх чинників. Не відповідність режиму роботи об'єкту потребам технологічного процесу знижує його ефективність. Отже, налаштування процедур контролю та формування управлінських впливів повинне здійснюватися з урахуванням фактичних умов роботи об'єкту [57]. Таким чином, система контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання повинна забезпечувати контроль дотримання БРЕ, а також контроль показників енергоефективності та основних технологіч-

них параметрів відповідно запланованому режиму водоподачі [75], причому, з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту. Аналіз отриманої інформації є основою прийняття управлінських рішень для швидкого коригування режиму роботи об'єкту у відповідь на змінні потреби технологічного процесу [309] і забезпечення ефективності електроспоживання.

5.2. Обґрунтування вибору методу контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопровідного господарства

5.2.1 Застосування технології ідентифікації мінливості процесів для вирішення задач контролю та удосконалення ефективності функціонування об'єктів

Для контролю стану об'єкту та його режимів роботи оцінюють відхилення поточних значень параметрів об'єкту дослідження від заданого чи певним чином визначеного нормативного значення [74]. В загальному випадку, контрольовані параметри повинні задовольняти обмеження:

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad i = \overline{1, N} \quad (5.1)$$

Вважається, що об'єкт функціонує неправильно, якщо відхилення перевищує допустиму величину [310].

Розрахункові значення контрольованих параметрів функціонування описуються рівнянням стану:

$$x_i^*(t) = F(x_i(t_0), u_{[t_0, t]}, K_i) \quad (5.2)$$

де $x_i(t_0)$ – вектор розрахункових технічних параметрів об'єкту дослідження;

$u_{[t_0, t]}$ – умови функціонування на проміжку часу $[t_0, t]$;

K_i – вектор параметрів, що характеризує режим роботи.

Результати вимірювань кожного з контрольованих параметрів залежать від відповідних параметрів технологічного процесу та умов протікання режиму роботи на момент вимірювань [310]:

$$x_i(t) = H(v_i(t), u_i(t)), \quad (5.3)$$

де $v_i(t)$ – вектор вимірювань параметрів на поточний момент часу;

$u_i(t)$ – умови функціонування об'єкту дослідження на поточний момент часу.

Межі контролю - це параметри вимірювань, що впливають з властивостей процесу. Хоча існують певні природні відмінності, результати вимірювань повинні потрапляти у визначений діапазон. Якщо вони виходять за межі цього діапазону, то існує проблема, яку необхідно вирішити. На основі раннього виявлення значних відхилень у процесі можна здійснити втручання в процес з метою підтримання його ефективного стану, що в ідеалі дозволяє покращити сам процес. Отже, контролювати процес означає виявляти та виправляти аномалії та невідповідності, вносити корективи в процес з метою поліпшення його ефективності [309]. Забезпечити та покращити ефективність будь-якого технологічного процесу можна за допомогою так званого оперативного управління якістю, що включає всі операційні методи та заходи, зосереджені на моніторингових процесах та усуненні причин невідповідності [311]. Важливою інтерпретацією удосконалення є зменшення мінливості (варіабельності) процесів [312], яку можна спостерігати в поведінці та результатах практично всіх процесів [313]. Варіабельність статистично керованого процесу обумовлена загальними випадковими причинами, які є внутрішньо властивими для даного процесу. Вплив деяких зовнішніх невідповідностей (особливих, спеціальних) причин може призвести до реальних змін в процесі і поведінка процесу може стати непрогнозованою, тобто, технологічний процес може перейти в стан статистичної некерованості. Усунення невідповідностей причин мінливості повертає процес в стан статистичної керованості [312]. Отже, призначення системи управління процесом полягає в своєчасному отриманні статистичного сигналу про наявність невідповідностей причин варіацій та подальшому їх усуненню.

Дієвими засобами запобігання виникненню невідповідностей і накопичення інформації для систематичного поліпшення будь-якого процесу є статистичні методи управління [313], які дають змогу краще використовувати доступні дані для підвищення ефективності процесу. Згідно [314] статистичне управління процесом (Statistical Process Control - SPC) - це метод контролю якості, який використовує статистичні методи для моніторингу та контролю процесу. SPC може бути

застосований до будь-якого процесу, для якого можна виміряти вихідні дані. SPC являє собою набір інструментів, що використовуються для розуміння та контролю технологічного процесу з метою досягнення його стабільності та поліпшення результативності, тобто покращення його ефективності [312] та постійного вдосконалення. Перевага інструментів SPC полягає в тому, що вони можуть ідентифікувати наслідки процесів, що спричиняють неприродну мінливість у процесах, які призводять до помилок і низької ефективності. [311], а також здатності до використання за різними параметрами. SPC дозволяє проводити моніторинг характеристик, що цікавлять, гарантуючи, що вони залишатимуться в заздалегідь встановлених межах, і вказує, коли слід вжити заходів щодо виправлення та вдосконалення [309]. Результати моніторингу за допомогою SPC дають об'єктивні дані, які допоможуть визначити, чи дійсно має місце постійне вдосконалення. Отже, ідеологія використання SPC узгоджується з ідеологією циклу Демінга, на якому засновані СЕМ, тобто, спрямована на постійне удосконалення. Таким чином, застосування інструментів SPC є доцільним для контролю енергоефективності об'єктів.

5.2.2 Особливості застосування інструментів контролю ефективності електроспоживання та інструментів статистичного управління процесу

Функціонування систем контролю енергоефективності передбачає зіставлення фактичних значень показників енергоефективності з їх попередньо заданим або певним чином визначеним планованим значенням [117, 143].

Для контролю ефективності електроспоживання та досягнутих результатів енергозбереження використовують [117, 143]: безпосереднє порівняння фактичного електроспоживання з плановим для кожного моменту часу; аналіз різниці (відхилень) між фактичним значенням споживання електроенергії та планованим.

Спостережене значення фактичного електроспоживання більше запланованого свідчить про перевитрату електроенергії, нижче – про економію. Якщо фактичне і планове значення електроспоживання співпадають, то вважають, що ефективність споживання електроенергії відповідає запланованому рівню.

Величина відхилення фактичного електроспоживання від встановленого

планового його значення:

$$\Delta W = W_{\text{факт}} - \hat{W}, \quad (5.4)$$

де $W_{\text{факт}}$ – фактичне електроспоживання;

\hat{W} – планове (очікуване) значення електроспоживання.

Від’ємні значення величин ΔW свідчать про економію електроенергії протягом відповідного періоду, а додатні – про її перевитрату.

З урахуванням вимог стандарту ISO 50001 показником для порівняння енергетичних характеристик є БРЕ, пов’язаний з певним проміжком часу та унормованим до визначальних змінних, що впливають на енергоспоживання. Отже, плановим значенням електроспоживання (БРЕ) є середнє значення електроспоживання, визначене на основі математичної моделі електроспоживання, побудованої за результатами експериментальних даних попередніх спостережень [117, 143], та з урахуванням очікуваних планових значень визначальних змінних. Для урахування випадкового характеру електроспоживання, залишкової похибки моделювання та недосконалості моделі з точки зору опису нових даних (невизначеності прогнозу) [169] планове значення електроспоживання задається у вигляді довірчих інтервалів до середнього значення теоретично очікуваного електроспоживання [143, 169], тобто у вигляді діапазону: $[\hat{W}_н; \hat{W}_в]$. Тоді, якщо $W_{\text{факт}} > \hat{W}_в$ має місце перевитрата електроенергії, якщо $W_{\text{факт}} < \hat{W}_н$ – економія, інакше – електроспоживання в межах норми. Величина відхилення фактичного електроспоживання від встановленого планового його значення $\hat{W}_{в(н)}$ розраховується відносно верхньої (у разі перевитрат енергії) або нижньої (у разі економії) межі довірчого інтервалу [143]:

$$\Delta W_{в(н)} = W_{\text{факт}} - \hat{W}_{в(н)}. \quad (5.5)$$

Такий спосіб контролю дає змогу визначити певні «критичні» періоди, отримати висновки про більш або менш ефективне електроспоживання у порівнянні зі встановленим БРЕ, однак не дозволяє зробити висновки про невідповідність зниження чи підвищення ефективності електроспоживання [315], тобто, встановити характер мінливості процесу.

Під час контролю будь-якого технологічного процесу та виявлення момен-

тів його виходу зі стану статистичної керованості загальноприйнятою є перевірка стабільності процесу з використанням контрольних карт (КК). КК - це ключовий інструмент SPC, який забезпечує візуалізацію характеристик процесу та використовується для розмежування випадкових та не випадкових варіацій під час моніторингу процесів з метою визначення потреби в корекціях чи змінах в процесі, щоб досягти кращого середнього значення або зменшення мінливості процесу [311]. Метод КК надає інформацію про процес під час його розвитку, дозволяє побачити, коли спостережувані величини виходять за допустимі межі, тобто, вчасно надає оперативну інформацію про необхідність корекції технологічного режиму. КК є графічним засобом аналізу, які легко інтерпретуються та будуються у виробничих умовах в реальному часі, забезпечують візуальне спостереження регульованої змінної та визначення змін у технологічному процесі на ранніх стадіях [309, 311, 312]. КК забезпечують оперативність, сигналізують про зміни в процесі, дають змогу оцінити величину зміни контрольованої змінної та частоти подібних випадків, є основою для введення коригуючих впливів із урахуванням обмежень на час прийняття рішень. На відміну від інших статистичних методів, що дають можливість зафіксувати стан процесу в певний момент часу, КК дозволяють відстежувати зміну стану процесу в часі і впливати на нього, попереджаючи появу невідповідностей встановленим вимогам.

Для перевірки та аналізу відхилень електроспоживання використовують два типи контрольних карт, які широко використовуються в контролі якості [312]:

- КК варіацій [316] (карти Шухарта), в яких для розпізнавання аномальної поведінки використовують контрольні межі, оцінені як кратні стандартного відхилення статистичного розподілу варіацій (як правило, $\pm 3\sigma$). Точки поза контрольними межами свідчать про не випадкові відхилення ;

- КК CUSUM (графік кумулятивної суми), що показує суму всіх різниць (відхилень) між фактичними та прогнозованими значеннями і характеризує тенденцію зміни у часі (накопичення) відхилення енергетичних показників [143, 149, 168, 308, 315, 316]. Зміна нахилу CUSUM являє собою зміну поведінки системи: тенденція до зростання означає зниження енергоефективності, тоді як тенденція

до спадання сигналізує про підвищення енергоефективності (економія енергії). Отже, карта CUSUM, дозволяє визначити «сумарну» (накопичену) зміну ефективності електроспоживання на всьому проміжку часу контролю [308].

Карти Шухарта забезпечують виявлення значних і короткострокових змін процесу. Карти CUSUM з великою ймовірністю виявляють невеликі, але постійні зміни. Пропонується як окреме застосування цих карт [168, 315] так і одночасне [316]. Спільний аналіз контрольних карт варіацій та CUSUM дозволяє визначити не лише аномалії, але й тенденції в поведінці електроспоживання, а отже визначити необхідність відповідних коригувальних дій [316]. Проте, CUSUM-карта чутлива до появи змін середнього [317], найменші постійні зрушення зумовлюють накопичення значної суми відхилень, що призводить до невірних результатів. Крім того, необхідність урахування циклічних змін під час визначення БРЕ, знижує дієвість карт CUSUM [315].

Для виявлення невинновості варіації рівня енергоефективності в [163, 169, 318] застосовано послідовний аналіз Вальда [319]. У цьому випадку ефективність електроспоживання контролюють, реєструючи кількість випадків виходу фактичних значень спожитої електроенергії за межі встановленого довірчого інтервалу [163, 169, 318]. При цьому, необхідно двічі здійснити процес послідовного контролю – для аналізу невинновості зниження рівня ефективності електроспоживання та аналізу невинновості підвищення його рівня [315]. Як наслідок, через громіздкість розрахункових процедур ускладнюється контроль. Крім того, необхідність урахування циклічних змін вимагає виконання даної процедури для кожного типового періоду. Багаторазове застосування послідовного аналізу Вальда на практиці використовується як контрольна карта CUSUM [320].

Слід зазначити, що результати контролю лише електроспоживання не дають змоги виявити та проаналізувати причини змін рівня енергоефективності, а отже прийняти правильні управлінські рішення щодо підвищення рівня енергоефективності об'єкту. Тому, необхідним є контроль визначальних змінних БРЕ [20, 58, 168], а також інших параметрів, які в результаті коригування набору визначальних змінних БРЕ не враховані під час побудови математичної моделі електроспо-

живання, але характеризують ефективність організації технологічного процесу водопостачання. Їх контроль є допоміжним засобом виявлення шляхів підвищення ефективності електроспоживання об'єкту водопостачання.

Одним із способів такого контролю є застосування одновимірних контрольних карт Шухарта, побудованих для кожного контрольованого технологічного параметра [20, 58]. При цьому, умовою їх коректного застосування є підпорядкованість нормальному закону розподілу. Крім того, сукупність одновимірних контрольних карт використовується у випадках, коли контрольовані характеристики є незалежними (некорельованими), інакше застосування одновимірних методів може призвести до помилкових сигналів [312, 321]. У випадку корельованих параметрів слід виконати перехід до некорельованих змінних [39], або ж застосовувати багатовимірні карти [168]. Однією з найбільш поширених карт такого типу є карта Хотеллінга [321]. Перевагою застосування карт Хотеллінга є можливість контролю групи взаємопов'язаних технологічних параметрів, що зменшує кількість карт, які потребують одночасного аналізу. Недоліком є неможливість виявлення безпосередньої причини порушення стабільності процесу (під впливом якого саме чинника це відбулось) та необхідність додаткової побудови та аналізу карт для кожного окремого чинника у випадку виявлення критичних моментів. Крім того, наявність лише однієї контрольної межі дозволяє встановити факт невідповідності нормативу, але не дає змоги встановити її характер: наявна тенденція до підвищення чи погіршення ефективності процесу.

5.2.3 Призначення застосування різних інструментів для вирішення завдань контролю енергоефективності

Аналіз особливостей застосування контрольних карт для контролю ефективності електроспоживання свідчить про необхідність контролю не лише електроспоживання, а й технологічних параметрів та показників енергоефективності шляхом поєднання різних інструментів контролю.

Для здійснення контролю ефективності електроспоживання доцільним є безпосереднє порівняння фактичних обсягів споживання електроенергії з запла-

нованими значеннями, встановленими як довірчі інтервали до очікуваного значення електроспоживання на підставі відповідної математичної моделі, а для контролю визначальних змінних з метою виявлення причин недотримання БРЕ – карт Шухарта [20, 58, 60] або Хотеллінга [168]. Рішення про те, які КК використовувати для оцінки невинуватених змін визначальних змінних, слід приймати на основі оцінки кореляцій між параметрами і перевірки їх значимості.

У випадку використання карт Шухарта (а також Хотеллінга) візуальна оцінка розташування фактичних значень контрольованих параметрів та меж регулювання забезпечує можливість виявлення певних сигналів контрольних карт. При цьому відслідковується поява систематичної тенденції в розміщенні точок на контрольній карті, що свідчить про наявність невинуватених структур певного виду [322, 323] та можливість порушення статистичної керованості процесу. За допомогою таких контрольних карт можна відслідкувати невинуватені суттєві зміни значень технологічних параметрів, що впливають на електроспоживання.

Крім того слід, звернути увагу на виконання вимог стандартів серії ISO 50000 щодо необхідності постійного удосконалення технологічної системи та підвищення її рівня енергоефективності. З цією метою необхідно виконувати контроль показників енергоефективності (наприклад, питомого електроспоживання), а як інструмент контролю доцільно застосувати карти Шухарта [32, 34, 39].

Аналіз КК, побудованих для електроспоживання, дасть змогу виявити моменти перевищення запланованого значення. Це буде сигналом про недотримання запланованого режиму роботи. Аналіз КК, побудованих для технологічних параметрів, дозволить виявити причини такого відхилення [58]. Спільний аналіз КК, побудованих для технологічних параметрів та ПЕЕ технологічного процесу, дасть змогу зробити висновок щодо ефективності організації режиму роботи об'єкту [58]. Аналіз КК для питомого електроспоживання дозволить виявити тенденції до покращення/погіршення рівня енергоефективності [20, 32, 34], контролювати наявність/відсутність удосконалення функціонування СТС та її об'єктів.

5.3 Організація комплексного контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання

5.3.1 Встановлення нормативів для контрольованих параметрів

Сутність задачі контролю енергоспоживання передбачає визначення як фактичних значень контрольованих параметрів, так і їх нормативних значень – цільових змінних, стандартів. Стандарт - параметр (вимога), якому має відповідати (задовольняти) контрольований процес за своїми ознаками, властивостями, якість. Для здійснення контролю енергоефективності в якості стандартів використовують планові значення контрольованих параметрів.

Контроль енергоефективності передбачає контроль електроспоживання W та множини p параметрів X_1, X_2, \dots, X_p . Коректне встановлення цільових змінних є важливим моментом для подальшого застосування процедури контролю [55]. Щоб нормативи не були завищеними чи заниженими необхідно враховувати реальні умови функціонування об'єкту контролю. Тому їх доцільно встановлювати на базі накопиченої статистики про параметри технологічного процесу, показники ефективності режиму роботи технологічного обладнання, обсяги споживання електроенергії [58]. Система моніторингу забезпечує створення великих баз даних, які є основою коректного визначення нормативів. При цьому, слід враховувати циклічні зміни технологічного процесу. Тобто, визначення нормативів повинне здійснюватися на основі вибірок даних, сформованих з урахуванням отриманих у розділі 4 результатів моніторингу циклічних змін процесу водоподачі, зумовлених впливом сезонних та соціальних чинників. При цьому, передбачається, що вибірки даних для кожного контрольованого параметру отримані з генеральної сукупності з нормальним розподілом.

Нормативами для визначальних змінних БРЕ, інших технологічних параметрів процесу водоподачі та показників ефективності режиму роботи об'єкту водопостачання (контроль яких передбачається для виявлення причин неефективного електроспоживання) є середнє значення кожного параметру, обчислене на основі вибірок даних для кожного типового сезону та типового дня, та допустимі межі його зміни, встановлені як довірчий інтервал для вибіркового математичного сподівання нормально розподіленої величини з довірчою імовірністю $p=0,997$.

В якості нормативу електроспоживання (БРЕ) застосовуються межі довірчих інтервалів, побудованих до прогнозних значень електроспоживання \hat{W} , обчислених на основі математичної моделі відповідного сезону та типу дня. Процедура визначення БРЕ з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту контролю описана в розділі 3 (п.3.5). При цьому, доцільно розглядати можливість різного підходу до врахування значень визначальних змінних під час визначення БРЕ. Якщо враховуються планові значення визначальних змінних, то варто вести мову про теоретично досяжний БРЕ за умови повної відповідності технологічного процесу запланованому. Якщо враховуються фактичні значення визначальних змінних, спостережені для конкретного часового проміжку, то варто вести мову про фактично досяжний БРЕ за фактичних умов реалізації технологічного процесу (рис. 5.1). Процедура визначення фактичного досяжного БРЕ повинна обов'язково передбачати урахування відповідності фактичного режиму роботи об'єкту запланованому. Інакше встановлення БРЕ та подальший контроль є некоректним. З цією метою виконується перевірка відповідності фактичних значень визначальних змінних запланованим межам.

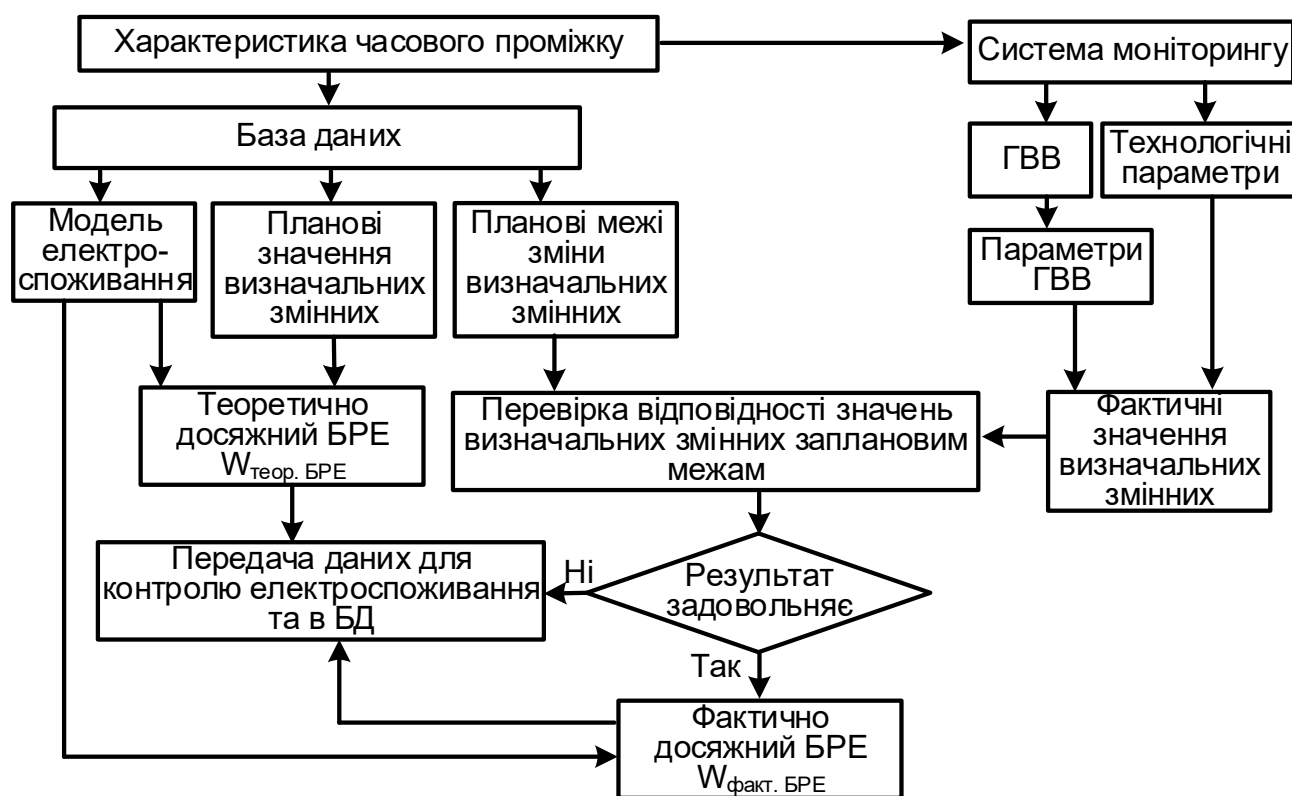


Рисунок 5.1 – Алгоритм визначення БРЕ

Визначення нормативів для питомого електроспоживання є аналогічним як і для технологічних параметрів та інших показників ефективності організації технологічного процесу. Визначення питомого електроспоживання повинне враховувати особливості функціонування вибраного об'єкту дослідження, для якого передбачається здійснювати контроль рівня енергоефективності, та його ієрархічного рівня [20]. Питоме електроспоживання в СКВ повинне визначатися з урахуванням об'ємів фактично реалізованої води $Q_{\text{реал}}$:

$$w_{\text{СКВ}} = \frac{W_{\text{СКВ}}}{Q_{\text{реал}}}, \quad (5.6)$$

де $W_{\text{СКВ}}$ - електроенергія, спожита на здійснення процесу водопостачання.

Визначення питомого електроспоживання для водозаборів повинне враховувати кількість спожитої електроенергії на здійснення підйому, підготування та подачі води в мережу $W_{\text{водозабору}}$ та об'ємів поданої в мережу води $Q_{\text{факт}}$:

$$w_{\text{водозабору}} = \frac{W_{\text{водозабору}}}{Q_{\text{факт}}}, \quad (5.7)$$

Питоме електроспоживання для насосних станцій визначається на основі електроспоживання НС $W_{\text{НС}}$ та фактичного об'єму перекачаної води $Q_{\text{факт.НС}}$:

$$w_{\text{НС}} = \frac{W_{\text{НС}}}{Q_{\text{факт.НС}}}, \quad (5.8)$$

При цьому, нормативами питомого електроспоживання виступають межі зон енергоефективності [20, 33], інтерпретація яких забезпечує оцінку рівня енергоефективності та контроль тенденції до її покращення/погіршення.

Таким чином, в результаті процедури планування для кожного з контролюваних параметрів задається очікуване середнє значення та певна область допустимих значень $X_{\text{дон}} \in \{x^H, x^E\}$, що задається межами його зміни.

5.3.2 Алгоритм комплексного контролю ефективності електроспоживання

Контроль може бути ефективним у випадку отримання та правильного використання інформації про стан керованої системи, відповідності її функціонування до намічених цілей. Сучасні тенденції управління передбачають впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами, контролю та обліку енергоспоживання. Для забезпечення роботи систем збору, обробки, відображення та архівування інформації про об'єкт управління використовують SCADA-системи. Всі ці елементи є складовими частинами системи моніторингу, впровадження якої забезпечує можливість створення БД, що містять інформацію про режими роботи об'єктів та чинники зовнішнього середовища, що визначають параметри технологічного процесу [57]. Тобто, процес моніторингу забезпечує постійне отримання інформації про електроспоживання, технологічні параметри, характеристики режимів роботи об'єктів СКВ [58]. Отже, доступна інформація про всі вхідні та вихідні аспекти технологічного процесу. Це забезпечує можливість постійного їх співставлення з встановленими нормативами.

Як зазначалось, вагомим чинником забезпечення ефективного електроспоживання та основою коректності встановлення БРЕ і подальшого контролю його дотримання є відповідність запланованого режиму водоподачі фактичному режиму витрати води з мережі водопостачання з урахуванням сезону та характеру дня. Тому, обов'язковим елементом та наступним після отримання даних з системи моніторингу етапом алгоритму контролю енергоефективності (рис. 5.2) є підтвердження факту відповідності фактичного режиму роботи об'єкту водопостачання запланованому з урахуванням заданого енергоменеджером класу типових умов роботи. Інакше встановлення БРЕ є некоректним і висновки, отримані в результаті виконання процедури контролю, не відповідатимуть дійсному стану справ.

Залежно від ієрархічного рівня об'єкту контролю процедура перевірки відповідності фактичного та запланованого режиму роботи об'єкту водопостачання визначається періодом дискретизації контролю та збору даних і передбачає:

- для СКВ (рівень підприємства) та водозаборів: перевірка відповідності фактичних значень визначальних змінних запланованим межам їх зміни, обчислених

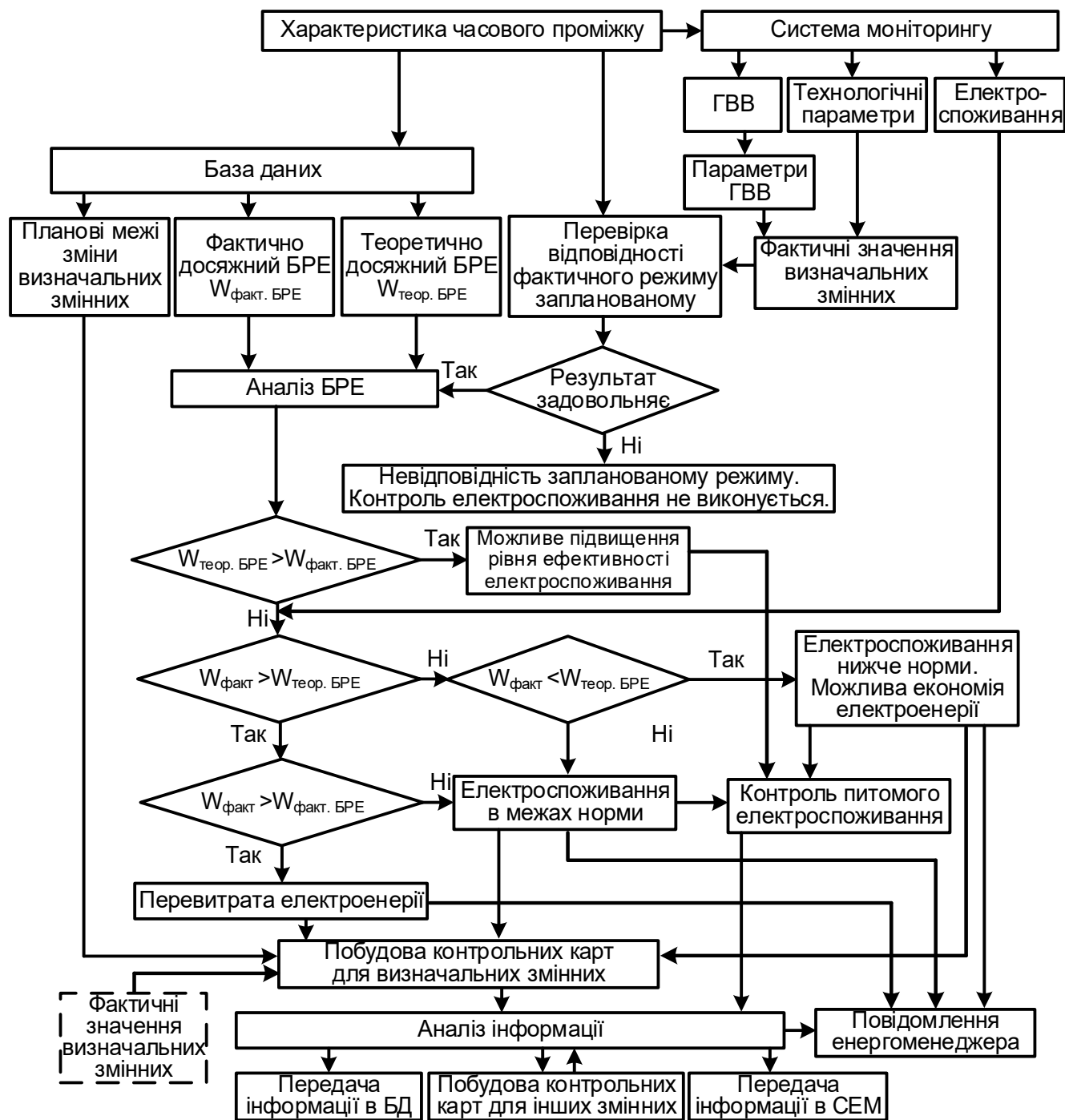


Рисунок 5.2 – Алгоритм комплексного контролю ефективності електроспоживання

з урахуванням меж зміни добових значень цих змінних для відповідного сезону та його тривалості впродовж контрольного місяця;

- для насосної станції II-го підйому: перевірка відповідності фактично спостереженого добового ГВВ запланованому з урахуванням сезону та типу дня. З цією метою застосовується процедура ідентифікації належності фактичного добового ГВВ до типових класів запропонована в п. 4.3.2.

Завершальним етапом процедури контролю є передача інформації в СЕМ для аналізу отриманих результатів, вироблення рекомендацій щодо підвищення енергоефективності та прийняття рішень щодо першочерговості їх впровадження.

Аналіз результатів контролю визначальних змінних є основою прийняття рішення щодо необхідності побудови контрольних карт для інших технологічних параметрів і показників ефективності організації технологічного процесу. Додатковий аналіз таких карт сприятиме виявленню інших причин неефективного електроспоживання та шляхів підвищення рівня енергоефективності.

5.3.3 Коригування процедури контролю з урахуванням впливу кліматичних чинників

Отримані в розділі 4 (п.4.5) результати дослідження вказують на необхідність врахування впливу на водоспоживання кліматичних чинників, зокрема, середньодобового та максимального значення температури повітря протягом сезонів «Весна-літо-осінь» та «Літо». Вплив кліматичних чинників проявляється у зміні значення добової ВВ з мережі водопостачання, профіля її добового ГВВ, а отже складових добової ВВ та морфометричних параметрів добового ГВВ. Отже, у випадку аномальних температур результати коригування планового значення добової ВВ та профіля її добового ГВВ можуть призвести до некоректних результатів контролю як самих визначальних змінних, так і відповідності фактичного та запланованого режимів роботи об'єкту водопостачання, особливо, нижчих рівнів. Для попередження таких випадків процедура контролю повинна передбачати можливість коригування (за потреби) планових меж зміни визначальних змінних та урахування відкоригованих прогностичних значень добової ВВ та її характеристик під час визначення БРЕ. Вирішення такого завдання можливе двома способами.

Перший – це коригування меж зміни параметрів визначальних змінних та результатів перевірки відповідності фактичного та запланованого режиму роботи об'єкту водопостачання шляхом втручання енергоменеджера, тобто спираючись на його досвід та інтуїцію. Даний спосіб є простим у реалізації, але базується на суб'єктивній думці енергоменеджера. Другий спосіб полягає у налаштуванні до-

даткової процедури контролю кліматичних чинників (рис. 5.3), яка передбачає побудову КК для кожного чинника з урахуванням даних метеорологічних спостережень. Поява в розташуванні даних на цих КК невідповідних структур спеціального типу є сигналом до необхідності коригування процедури планування визначальних змінних та результатів перевірки відповідності фактичного та запланованого режимів роботи об'єкту водопостачання.

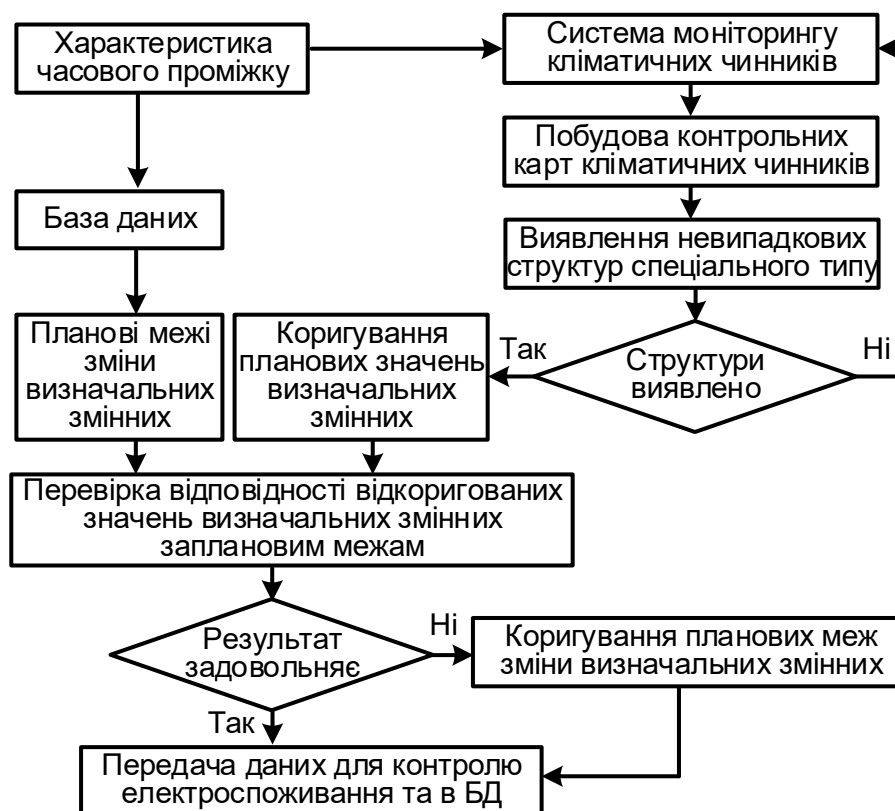


Рис. 5.3 - Алгоритм коригування планових значень визначальних змінних з урахуванням впливу кліматичних чинників

Реалізація другого способу є складнішою, проте дозволяє усунути вплив суб'єктивної думки енергоменеджера щодо необхідності коригування процедури контролю. Слід зазначити, що коригування меж зміни певної визначальної змінної є доцільним, якщо її прогнозне значення не відповідає попередньо встановленим межам зміни. У цьому випадку, як планові межі зміни визначальної змінної приймають межі, відкориговані з урахуванням довірчого інтервалу до її прогнозного значення.

5.3.4 Коригування процедури контролю з урахуванням результатів бенчмаркінгу

Зміни енергоефективності повинні вимірюватися відносно БРЕ, зафіксованого у вихідному енергетичному профілі, а також з урахуванням кращих зразків енергоефективності. Тому, контроль ефективності електроспоживання повинен передбачати врахування БРЕ, побудованого [43, 66]:

- для об'єкту дослідження з урахуванням його реальних умов функціонування для поточного контролю ефективності енергоспоживання;
- для аналогічного об'єкту, який є кращим за рівнем енергоефективності в групі однотипних, для порівняльного аналізу ефективності енергоспоживання.

Аналогічний підхід повинен використовуватися і для контролю показників енергоефективності, зокрема, питомого електроспоживання.

При цьому слід зважати на практично можливе досягнення встановлених орієнтирів для підвищення рівня енергоефективності. Отже, необхідно враховувати фактичний стан об'єкту з точки зору енергоефективності під час вибору кращої практики (еталону) для порівняння та наслідування (рис. 5.4)

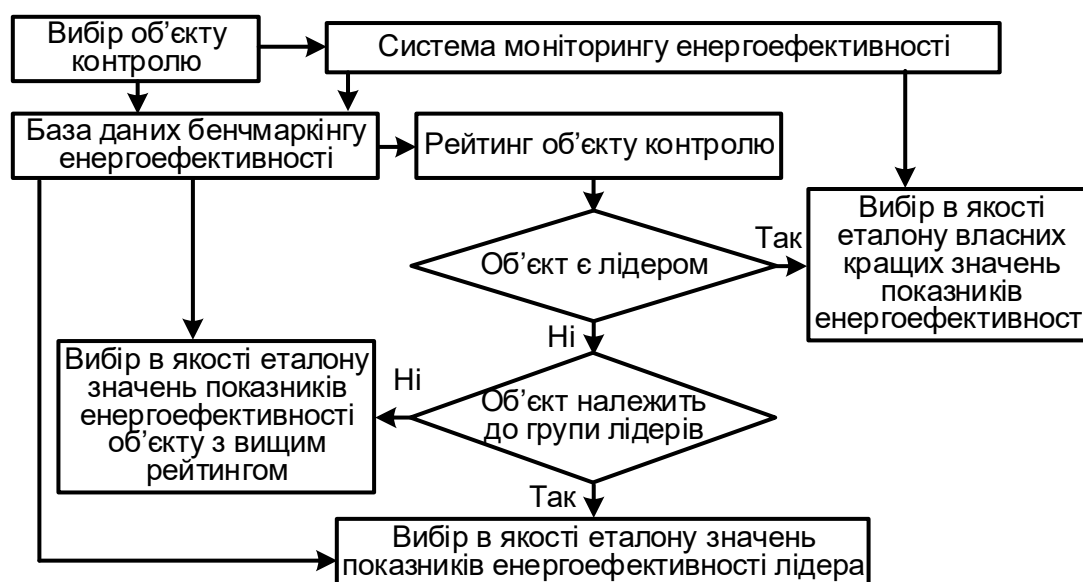


Рисунок 5.4 – Алгоритм вибору кращої практики (еталону)

Урахування кращої практики в процедурі контролю ефективності електро-споживання полягає у коригуванні процедури планування електроспоживання. Оскільки умови функціонування (технологічні завдання технологічного процесу

водопостачання) об'єкту контролю та обраного лідера відрізняються, то як еталон приймається математична модель електроспоживання, побудована для кращого об'єкту, на основі якої обчислюється теоретично та фактично досяжні БРЕ для контрольованого об'єкту з урахуванням його планових та фактичних значень визначальних змінних.

У випадку контролю питомого електроспоживання як еталонні нормативи питомого електроспоживання приймаються межі зон енергоефективності, визначені для обраного об'єкту наслідування [20, 33]. Відносно цих меж здійснюється порівняльний аналіз енергоефективності об'єкту контролю.

Для виявлення шляхів досягнення позицій обраного для наслідування еталону необхідним є врахування результатів оцінювання рівня енергоефективності з позицій бенчмаркінгу (в тому числі, результатів самооцінки) та налаштування додаткових процедур контролю показників ефективності організації технологічного процесу водопостачання. В цьому випадку як нормативи для контрольованих показників приймаються межі зміни відповідних показників кращого об'єкту.

5.3.5 Контроль відповідності базового рівня електроспоживання фактичним умовам режиму роботи об'єкту водопостачання

Об'єкти водопостачання функціонують в умовах невизначеності, причиною яких є кліматичні, погодні умови, соціальні чинники, а також процес постійного удосконалення режиму роботи самого об'єкту як засобу підвищення його рівня енергоефективності. Як наслідок БРЕ, встановлений на основі математичної моделі електроспоживання для відповідних типових умов роботи об'єкту водопостачання не відповідатиме його фактичним умовам функціонування через їх зміну.

В загальному випадку задача побудови математичної моделі будь-якого процесу полягає у виборі її структури і оцінці її параметрів таким чином, щоб при використанні деякої функції різниці розрахованих та експериментальних даних виконувалась умова близькості моделі до об'єкту, що досліджується, у заданій мірі. При цьому побудована модель повинна бути працездатною у режимі прогнозу вихідної змінної при варіації вхідної. Порушення прогнозуючих властивостей,

тобто, значне відхилення прогнозу від фактичних значень, може бути ознакою виникнення розладнання процесу прогнозування [324]. Отже, методика побудови БРЕ об'єктів водопостачання має бути доповнена процедурою контролю якості прогнозу - так званого контрольованого прогнозу. Для прискорення реакції прогнозуючої системи на зміни умов функціонування об'єкту доцільно використовувати специфічний індикатор, який стежив би за якістю прогнозу і вловлював момент, коли ця якість стає незадовільною. Таким є контрольний слідкуючий сигнал (трекінг-сигнал), що є індикатором розладнань контрольованих процесів [324].

Нехай інформація про об'єкт задана у вигляді часової послідовності $\{y(t_1), \dots, y(t_n)\}$, що описує вихідний сигнал. Задача визначення розладнання полягає у встановленні істинності гіпотез: гіпотеза H_0 - на всьому інтервалі спостереження розладнань немає, тобто, послідовність $\{y(t)\}$, $t=1, \dots, n$ відповідає незмінній моделі M_0 ; гіпотеза H_1 - існує момент часу t_r , $1 < t_r < n$ такий, що послідовність $\{y(t_1), \dots, y(t_{r-1})\}$ відповідає моделі M_0 , а послідовність $\{y(t_r), \dots, y(t_n)\}$ - моделі M_1 [324]. При цьому модель M_1 може відрізнятися від моделі M_0 структурою, параметрами, характеристиками збурень $\xi(t)$.

Більшість відомих тестів для визначення розладнань процесу прогнозування засновано на контролі послідовності похибок прогнозу $e(t)$, що постійно оновлюється [324]. Якщо прогноз послідовно створює занадто високі або занадто низькі значення, це є ознакою, що процес прогнозування виходить з-під контролю. Метод слідкуючого сигналу передбачає постійне визначення похибки прогнозу та наявність заздалегідь встановлених для неї меж. Існують різні форми слідкуючих сигналів, при цьому вихід їх за визначені межі свідчить про виникнення розладнань [324]. Брауном запропоновано використовувати вираз [324]:

$$T(t) = \frac{\sum_{i=1}^n e(t_i)}{\sqrt{\hat{\sigma}_e^2(t)}} \quad (5.9)$$

де $\hat{\sigma}_e^2(t)$ - оцінка дисперсії послідовності похибок прогнозу $e(t)$.

Фізичний зміст (5.9) полягає в тому, що у випадку адекватності моделі

об'єкту сума похибок в силу випадковості останніх варіює навколо нуля, не перевищуючи при цьому деяких меж, які встановлюються апріорно для даного рівня ймовірності при визначеній дисперсії суми похибок прогнозу [324]. Для нормально розподілених збурень похибка прогнозу повинна лежати в інтервалі $\pm \delta_{1-p} \sqrt{\sigma_e^2}$ (де δ_{1-p} – значення стрибка прогнозу або коефіцієнт ширини прогнозного інтервалу, що відповідає заданій точності прогнозу), тобто з ймовірністю P величина $T(t)$ буде знаходитись у межах $\pm \delta_{1-p}$. Так, для ймовірності прогнозу $P=0,95$ значення стрибка $\delta_{1-p}=2$. Отже, значення слідкуючого сигналу в межах ± 2 з ймовірністю $P=0,95$ свідчить про адекватність прогновної моделі процесу. Вихід сигналу за встановлені межі свідчить про те, що в процесі відбулися зміни, які не відстежуються моделлю. Отже, процес прогнозування вимагає коригування (коригування параметрів моделі, зміни прогновної моделі або методу прогнозування).

В практичних розрахунках Браун замість середньоквадратичної похибки σ_e запропонував використовувати середнє абсолютне відхилення, яке пропорційне середньоквадратичному значенню похибки [324]. Отже, відношення загальної суми похибок прогнозу (відхилень між прогнозованим та фактичним значеннями) до середнього абсолютного відхилення слід розглядати як одну із форм слідкуючого сигналу:

$$T(t) = \frac{\sum_{i=1}^n e(t_i)}{\text{MAD}} = \frac{\sum_{i=1}^n [y(t_i) - \hat{y}(t_i)]}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y(t_i) - \hat{y}(t_i)|} \quad (5.10)$$

Універсальність трекінг-сигналу визначається можливістю його застосування з різними методами прогнозування.

Проте застосування процедури контрольованого прогнозу безпосередньо до БРЕ є ускладненим через специфіку застосування результатів порівняння фактичного та прогнозного (планового) значення електроспоживання. Тому для виявлення моментів зміни математичної моделі електроспоживання відповідно до зміни умов роботи об'єкту водопостачання, зумовленого впливом сезонних чинни-

ків, слідкуючий сигнал пропонується застосовувати до процесу прогнозування добової витрати води з мережі водопостачання. Це дозволить виявити моменти невідповідності математичної моделі для заданого енергоменеджером класу типових умов фактичним умовам водоспоживання, що свідчитиме про факт зміни типових умов роботи об'єкту та необхідність зміни математичної моделі для прогнозування як витрати води, так і електроспоживання.

Постійне удосконалення ефективності процесу водоподачі відображатиметься у зниженні фактичного електроспоживання об'єкту водопостачання. Отже, моментом розладнання процесу планування електроспоживання слід вважати момент, коли фактичне значення електроспоживання не перевищуватиме БРЕ ($W_{\text{факт}} < W_{\text{факт.БРЕ}} < W_{\text{теорет.БРЕ}}$), а характеристики технологічного процесу будуть знаходитись в межах, що відповідають умові забезпечення ефективного режиму водоподачі (згідно табл. 5.1 та 5.2). Це означатиме, що на об'єкті досягнутий новий рівень енергоефективності і математична модель електроспоживання повинна бути переглянута та відкоригована.

5.4 Узагальнена процедура застосування контрольних карт для контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання

5.4.1 Дослідження вибірок на відповідність нормальному закону розподілу ймовірностей

Для карт Шухарта, що використовують кількісні дані, передбачається нормальний закон розподілу ймовірностей. Відхилення від цього припущення впливає на ефективність карт, оскільки коефіцієнти, що використовуються для обчислення контрольних меж, отримано для нормального розподілу характеристик [322]. Статистика Хотеллінга досить чутлива до відсутності багатовимірної нормальності (до асиметрії розподілу), при цьому ця чутливість зростає зі збільшенням числа аналізованих характеристик процесу, що обмежує можливість застосування карти Хотеллінга [321].

Для нормального закону розподілу характеристики центру тяжіння (середнє

арифметичне \bar{x} , мода Mo та медіана Me) співпадають. Перевірка гіпотези про нормальність закону розподілу базується на визначенні значень коефіцієнтів асиметрії та ексцесу [248]:

$$A_s = \frac{\mu_3}{(\mu_2)^{3/2}} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}}, \quad (5.11)$$

$$E_k = \frac{\mu_4}{(\mu_2)^2} - 3, \quad (5.12)$$

де μ_2, μ_3, μ_4 – центральний момент другого, третього та четвертого порядку.

Незміщені оцінки коефіцієнтів [248]:

$$A_{ns} = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} A_s; \quad (5.13)$$

$$E_{nk} = \frac{n-1}{(n-2)(n-3)} [(n+1)E_k + 6]. \quad (5.14)$$

Для нормального розподілу, $A_s=0$ і $E_k=0$.

Стандартне відхилення коефіцієнту асиметрії та коефіцієнту ексцесу:

$$s_{A_s} = \sqrt{\frac{6}{n+3}} \quad (5.15)$$

$$s_{E_k} = 2 \cdot s_{A_s} = 2 \cdot \sqrt{\frac{6}{n+3}} \quad (5.16)$$

Перевіряється гіпотеза H_0 : випадкова величина має розподіл, відмінний від нормального. Гіпотеза H_0 відкидається, якщо:

$$|A_{ns}| < \frac{s_{A_s}}{1,5 \div 2} = (0,5 \div 0,67) \sqrt{\frac{6}{n+3}}; \quad (5.17)$$

$$E_{nk} < \frac{s_{E_k}}{1,5 \div 2} = (1 \div 1,33) \sqrt{\frac{6}{n+3}}. \quad (5.18)$$

Для статистичної перевірки гіпотези про відповідність нормальному закону

розподілу використовується критерій згоди Пірсона χ^2 [325]:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (5.19)$$

де p_i - імовірність попадання випадкової величини в l -й інтервал:

$$p_i = \frac{1}{2}(\Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i)), \quad (5.20)$$

де $\Phi(z)$ - нормована функція Лапласа.

Виконання умови $\chi^2 \leq \chi_{кр.\alpha;\nu}^2$ (де α - рівень значимості; $\nu = l - m - 1$ - кількість ступенів свободи) свідчить про прийняття нульової гіпотези, що підтверджує відповідність вибірки нормальному закону розподілу.

Оскільки контрольні межі використовуються як емпіричні критерії для прийняття рішень, то допустимо нехтувати малими відхиленнями від нормальності. Проте істотні відхилення від нормального закону розподілу імовірностей знижують ефективність застосування КК.

У разі порушення нормальності розподілу контрольованого параметру як у випадку використання карт Шухарта, так і карт Хотеллінга (одного або декількох) необхідно передбачити процедуру нормалізації даних, наприклад, з використанням розподілів Джонсона [326].

5.4.2 Визначення меж регулювання контрольних карт

Під час виконання процедури контролю із застосуванням апарату SPC як контрольні межі КК (межі регулювання) доцільно використовувати визначені на етапі планування межі зміни контрольованих параметрів.

Для електроспоживання контрольними є межі довірчого інтервалу до очікуваного значення електроспоживання, побудованого з довірчою ймовірністю $p=0,95$, що за умови нормального закону розподілу відповідає діапазону $\pm 2\sigma_w$ відносно середнього значення електроспоживання $\bar{W} = \hat{W}$. Доцільним є додаткове встановлення попереджувальних меж, що відповідають діапазону $\pm \sigma_w$ для вияв-

лення фактів наближення фактичного електроспоживання до контрольної межі.

У випадку застосування карт Шухарта для контролю технологічних параметрів та показників ефективності режиму роботи об'єктів водопостачання доцільним є застосування КК індивідуальних значень (X-карта) і ковзних розмахів (R_m -карта). Вони не вимагають визначення раціональних груп для забезпечення оцінки змінності процесу [322]. Контрольні межі обчислюють на основі міри варіації, яку отримують по ковзних розмахах двох послідовних спостережень x_i, x_{i-1} :

$$R_m = |x_i - x_{i-1}| \quad (5.21)$$

Середній ковзний розмах (його використовують для побудови КК) [322]:

$$\bar{R}_m = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n R_{m_i} . \quad (5.22)$$

Оцінка меж регулювання для карти ковзного розмаху [322]:

$$L_{CL}(R_m) = D_3 \cdot \bar{R}_m ; \quad (5.23)$$

$$U_{CL}(R_m) = D_4 \cdot \bar{R}_m , \quad (5.24)$$

де D_3, D_4 - константи, що залежать лише від об'єму вибірки n . Оскільки використовують розмах між двома послідовними значеннями, то для вибірки в два спостереження $D_3 = 0$; $D_4 = 3,267$.

Якщо варіація процесу є стабільною, оцінку ковзного розмаху використовують для створення КК індивідуальних значень.

Центральна лінія КК це є середнє з індивідуальних спостережень:

$$CL = \bar{X} \quad (5.25)$$

Оцінка нижньої та верхньої межі регулювання [322]:

$$L_{CL} = \bar{X} - 2,66 \cdot \bar{R}_m ; \quad (5.26)$$

$$U_{CL} = \bar{X} + 2,66 \cdot \bar{R}_m . \quad (5.27)$$

де 2,66 – константа. Її обчислено за умови забезпечення співвідношення між середнім ковзним розмахом та стандартним відхиленням [322]:

$$3 \cdot \sigma = 3 \cdot \frac{\bar{R}_m}{d_2}, \quad (5.28)$$

де d_2 - константа, що залежить лише від об'єму вибірки n . Для ковзного розмаху між двома послідовними спостереженнями $d_2 = 1,128$ [322].

Коефіцієнти, що використовуються для обчислення контрольних меж, отримано для нормального розподілу імовірностей характеристик [322]. Згідно [327] для спостережень чотири та більше розподіл імовірностей у вибірці буде близький до нормального закону.

Отже, контрольними з достатнім рівнем достовірності є межі зміни $[x_{\min}, x_{\max}]$ технологічного параметра або показника ефективності режиму роботи об'єкту водопостачання у вигляді довірчого інтервалу до вибіркового середнього, побудованого з довірчою імовірністю $p=0,997$ [58]. Ці межі відповідають правилу «трьох сігм». Межі на відстані $\pm 3\sigma$ від центральної лінії показують, що приблизно 99,7% значень статистики потраплять в ці межі за умови, що процес знаходиться в статистично керованому стані [322]. Комбінація верхньої (U_{CL}) та нижньої (L_{CL}) контрольної межі вказує на мінливість, обумовлену природними причинами. Для попередження про наближення процесу до виходу зі стану статистичної керованості КК використовуються попереджувальні межі, встановлені за правилом «двох сігм»: на відстані $\pm 2\sigma$ (з довірчою імовірністю $p=0,954$). У випадку необхідності коригування контрольних меж технологічних параметрів після зміни умов технологічного процесу або модернізації технологічного об'єкту достатньо отримати нову вибірку об'ємом чотири спостереження, щоб встановити нові контрольні межі, які мають статистичну значущість за критерієм Шухарта.

У випадку застосування карт Хотеллінга для групи взаємокорельованих параметрів розраховується узагальнена статистика Хотеллінга [328]:

$$T_t^2 = n(\bar{X}_t - \mu_0)^T S^{-1}(\bar{X}_t - \mu_0) \quad (5.29)$$

де n – кількість значень кожного окремого параметра в миттєвій вибірці;

\bar{X}_t – вектор середніх в миттєвих вибірках значень параметрів для деякого мо-

менту часу $t=(1,\dots,m)$: $\bar{X}_t = (\bar{x}_{t1}, \bar{x}_{t2}, \dots, \bar{x}_{tp})^T$;

μ_0 – вектор цільових середніх: $\mu_0 = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)^T$;

S – оцінка коваріаційної матриці, що визначає розсіювання значень параметрів і кореляції між ними (матриця має розмірність $p \times p$, де p – кількість параметрів, які контролюються).

Для карт індивідуальних значень параметрів ($n=1$) \bar{X}_t – це є вектор фактичних значень параметрів в момент часу t : $\bar{X}_t = (x_{t1}, x_{t2}, \dots, x_{tp})^T$, а μ_0 – вектор середніх значень параметрів, визначених за відповідною передісторією: $\mu_0 = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_p)^T$. Для визначення незміщених оцінок компонент коваріаційної матриці використовуються ковзні розмахи [328]:

$$R_{jt} = x_{j,t+1} - x_{j,t}, \quad t = 1, \dots, m-1 \quad (5.30)$$

$$s_{jk} = \frac{1}{2(m-1)} \sum_{t=1}^{m-1} R_{j,t} \cdot R_{k,t} \quad (5.31)$$

Критичне значення статистики Хотеллінга, що відповідає контрольній межі (лише одній - верхній), визначають як квантиль розподілу хі-квадрат порядку p [312, 321]:

$$T_{kp}^2 = \chi_{1-\alpha}^2(p). \quad (5.32)$$

де α – рівень значимості χ^2 .

У випадку використання індивідуальних спостережень [312, 321]:

$$T_{kp}^2 = \frac{p(m-1)}{m-p} F_{1-\alpha}(p, m-p) \quad (5.33)$$

де $F_{1-\alpha}(k_1, k_2)$ – квантиль F-розподілу Фішера с числом ступенів свободи в чисельнику k_1 , в знаменнику – k_2 .

Для підвищення ефективності багатовимірною контролю доцільним є використання модифікованої карти Хотеллінга, яка містить додаткові попереджувальні межі [329], визначені як $1/3T_{kp}^2$ та $2/3T_{kp}^2$ за аналогією з рекомендованою стандартом [322] методикою виявлення структур спеціального виду на карті Шухарта

(що свідчать про можливе порушення процесу).

Для карт Шухарта, побудованих для питомого електроспоживання, межі регулювання встановлюються з урахуванням підходу «шість сігм» та відповідної інтерпретації отриманих зон з точки зору оцінки рівня енергоефективності [20, 33].

5.4.3 Інтерпретація результатів застосування контрольних карт

Визначені межі регулювання КК забезпечують можливість визначення меж зміни якісного стану контрольованого процесу та інтерпретації отриманих результатів з точки зору його ефективності. Визначення сигналів контрольних карт виконується на основі візуальної оцінки розташування спостережених значень контрольованого параметра відносно одне одного та меж регулювання. При цьому відслідковується поява систематичної тенденції в розміщенні точок на КК для виявлення не випадкових структур спеціального виду [321, 322, 329].

Згідно [322] для інтерпретації статистичної керованості процесу із застосуванням карт Шухарта застосовується вісім критеріїв. Ці критерії пропонується розглядати як приклади ситуацій, що вказують на наявність особливих факторів, які необхідно врахувати. При цьому на КК виділяють 6 зон, шириною 1σ : A^B , B^B , C^B , C^H , B^H , A^H : зона С - $\pm 1\sigma$ CL; зона В – від $\pm 1\sigma$ до $\pm 2\sigma$ від CL; зона А – від $\pm 2\sigma$ до $\pm 3\sigma$ від CL.

Рекомендації [322] є основою інтерпретації сигналів КК, що використовуються для контролю ефективності електроспоживання, але при цьому необхідно враховувати суть поняття енергоефективність, специфіку задачі контролю та особливості побудови КК для різних контрольованих параметрів.

Особливість визначення меж регулювання КК для електроспоживання зумовлюють відповідне визначення зон та інтерпретацію результатів контролю:

- зона B^B – від $\bar{W} + 1\sigma_W$ до $\bar{W} + 2\sigma_W$;
- зона С - $\bar{W} \pm 1\sigma_W$;
- зона B^H – від $\bar{W} - 1\sigma_W$ до $\bar{W} - 2\sigma_W$.

Причому розміщення точок над верхньою контрольною межею (над зоною B^B) сигналізує про перевитрати електроенергії; в зоні B^B - про наближення до вер-

хньої контрольної межі та небезпеку появи перевитрати; в зоні С – про коливання електроспоживання відносно очікуваного середнього значення, зумовлене випадковими причинами; в зоні В^н - про наближення до нижньої контрольної межі та можливість економії електроенергії; під нижньою контрольною межею (під зоною В^н) сигналізує про економію електроенергії.

Інтерпретація карт Шухарта, побудованих для технологічних параметрів або показників ефективності режиму роботи, попередньо вимагає встановлення характеру впливу відповідного показника на ефективність електроспоживання, тобто, контрольовані параметри повинні бути розділені на стимулятори та дестимулятори [39]. Для виявлення характеру впливу контрольованих параметрів технологічного процесу на енергоспоживання доцільно застосувати кореляційний аналіз. Параметр слід вважати стимулятором енергоефективності, якщо коефіцієнт кореляції набуває від'ємних значень, інакше – дестимулятором [60]. Таке розбиття змінює інтерпретацію контрольних карт [20, 45, 87]. Для дестимуляторів зона незадовільного (неефективного) стану відповідає діапазону контрольної карти над верхньою контрольною межею, а для стимуляторів – під нижньою [39, 60]. Відповідно змінюється інтерпретація зон КК (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Інтерпретація зон контрольних карт Шухарта залежно від характеру впливу показника на ефективність електроспоживання

Зона	Діапазон	Характеристика зони	
		Стимулятори	Дестимулятори
A ^в	$(\bar{x} + 2\sigma) \div (\bar{x} + 3\sigma)$	Досягнення ефективнішого, ніж запланований, режиму роботи	Можливе перевищення допустимої межі. Збільшення витрати електроенергії
B ^в	$(\bar{x} + 1\sigma) \div (\bar{x} + 2\sigma)$	Можливе досягнення ефективнішого режиму роботи	Можливе погіршення ефективності електроспоживання
C	$\bar{x} \pm 1\sigma$	Відхилення від планового значення	Відхилення від планового значення
B ^н	$(\bar{x} - 1\sigma) \div (\bar{x} - 2\sigma)$	Можливе погіршення ефективності електроспоживання	Можливе досягнення ефективнішого режиму роботи
A ^н	$(\bar{x} - 2\sigma) \div (\bar{x} - 3\sigma)$	Можливе перевищення допустимої межі. Збільшення витрати електроенергії	Досягнення ефективнішого, ніж запланований, режиму роботи

Аналіз розміщення точок на КК дозволить виявити незаплановані відхилен-

ня технологічних параметрів та причини погіршення ефективності, а аналіз тенденції розміщення точок на КК забезпечить виявлення не випадкових структур спеціального виду [321, 322], які можуть призвести до відповідних змін ефективності електроспоживання.

У випадку застосування карт Хотеллінга інтерпретація результатів та процедура виявлення причин, що зумовили неефективне електроспоживання, дещо ускладнюється. Наявність однієї контрольної межі зумовлює виділення трьох зон: зона А - від $2/3T_{кр}^2$ до $T_{кр}^2$; зона В - від $1/3T_{кр}^2$ до $2/3T_{кр}^2$; зона С - від 0 до $1/3T_{кр}^2$. При чому, інтерпретація появи точок в межах виділених зон з точки зору характеру впливу на ефективність електроспоживання є неможливою. Їх застосування дозволяє лише виявити не випадкові структури спеціального виду [321, 329], що вкажуть на можливість виходу процесу з керованого стану.

Фактом порушення керованого стану групи контрольованих параметрів в момент часу t_0 є поява точок над контрольною межею ($T_{t_0}^2 > T_{кр}^2$) [328]. Цей факт свідчить про зміни числових значень певного набору технологічних параметрів, що і є причиною не випадкових змін рівня енергоефективності об'єкту. Причому, карта Хотеллінга не дає змоги визначити, з яким із показників (або спільним впливом показників) пов'язане таке порушення. Для інтерпретації результатів контролю та виявлення показника, який зумовив таке порушення, необхідним є визначення часткових статистик Хотеллінга [328]:

$$T_j^2 = m \left[c_j^T (\bar{X}_{t_0} - \mu_0)^2 \right] / [c_j^T S c_j] \quad (5.34)$$

де m – кількість значень кожного окремого параметра в миттєвій вибірці (для карт індивідуальних значень параметрів m дорівнює 1);

c_j – вектор стовбець з нулями в усіх рядках, крім j -го, який відповідає умовному номеру технологічного параметра, що розглядається;

\bar{X}_{t_0} – матриця поточних значень технологічних параметрів, що розглядаються, в момент часу t_0 ;

$X_{сер}$ – вектор середніх значень чинників, що впливають на електроспоживання, визначених за відповідною передісторією.

Якщо $T_j^2 > T_{кр}^2$, то відповідальність за порушення стабільності процесу несе j -й параметр. Такі перевірки необхідно виконати для кожного з взаємокорельованих параметрів. Якщо для жодного з параметрів умова не виконується, це свідчить, що порушення в процесі зумовлені спільною дією кількох параметрів. В такому випадку, для виявлення показника, який зумовив порушення стабільності процесу, необхідним є застосування процедури почергового видалення показників та побудови карти Хотеллінга для $(p-1)$ параметрів [328], що ускладнює процедуру контролю. Тому, у випадку слабкої кореляції між параметрами для виявлення показника, який зумовив порушення процесу, можливе застосування КК Шухарта.

Контроль питомого електроспоживання здійснюється для виявлення наявності/відсутності тенденції до покращення/погіршення рівня енергоефективності. Це зумовлює певну особливість інтерпретації карт Шухарта [20, 33], яка передбачає якісну оцінку рівня ефективності електроспоживання. Виділяють зелену зону, розміщену під CL (добрий рівень енергоефективності) та червону зону, розміщену над CL (задовільний рівень енергоефективності). Незадовільний рівень енергоефективності має місце, якщо значення питомого електроспоживання знаходиться над червоною зоною. Для контролю рівня ефективності електроспоживання введено якісну оцінку підзон А, В, С зон енергоефективності залежно від їх розміщення (над чи під CL) [20, 33] (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Інтерпретація зон контрольних карт Шухарта для питомого електроспоживання

Зона	Діапазон	Характеристика зони за рівнем ефективності електро- споживання
A ^B	$(\bar{w} + 2\sigma_w) \div (\bar{w} + 3\sigma_w)$	Низький рівень
B ^B	$(\bar{w} + \sigma_w) \div (\bar{w} + 2\sigma_w)$	Стабільно задовільний рівень
C ^B	$(\bar{w}) \div (\bar{w} + \sigma_w)$	Середній рівень
C ^H	$(\bar{w}) \div (\bar{w} - \sigma_w)$	Достатньо добрий рівень
B ^H	$(\bar{w} - \sigma_w) \div (\bar{w} - 2\sigma_w)$	Добрий рівень
A ^H	$(\bar{w} - 2\sigma_w) \div (\bar{w} - 3\sigma_w)$	Високий рівень

Належність спостереженого значення питомого електроспоживання до певної зони енергоефективності забезпечує якісну характеристику рівня ефективності електроспоживання. Аналіз розміщення точок на КК із застосуванням відповідного тлумачення загальноприйнятих тестів (критеріїв) [20, 33], що використовуються для інтерпретації протікання процесу по картах Шухарта, забезпечить виявлення тенденцій, що відбуваються в процесі електроспоживання.

5.5 Організація повідомлень енергоменеджера про відхилення контрольованих параметрів від їх нормативу

5.5.1 Призначення інструментів сигналізації в системі контролю енергоефективності об'єктів

Останнім етапом процедури контролю є ідентифікація «тривоги» та повідомлення енергоменеджера про перевищення встановлених нормативів. Для цього використовують інструменти сигналізації (IC) (англ. alarm). В організації інформаційної системи контролю енергоефективності «alarm» і «норматив» тісно пов'язані між собою [45, 55, 330].

Інформаційні системи енергоменеджменту інтегруються з автоматизованими системами управління технологічними процесами, SCADA-системами (системами диспетчерського управління та збору даних), що дозволяє накопичувати інформацію, створювати нові БД та передавати їх в інші системи [330]. IC є обов'язковим компонентом будь-якої SCADA-системи. Механізм реалізації підсистеми сигналізації визначається призначенням системи контролю [65]: задачами дослідження, об'єктом дослідження, набором його показників енергоефективності.

На основі даних системи моніторингу можливо визначити деякий норматив для контрольованого параметра, прив'язати до нього IC і контролювати відхилення від нормативу [330] та інформувати енергоменеджера про результати контролю. При цьому слід враховувати тип IC, тобто, виділяти IC, які мають характер тривоги та потребують уваги енергоменеджера, та IC, які відповідають подіям і мають інформативний характер.

5.5.2 Принципи налаштування інструментів сигналізації про відхилення від нормативу

Для здійснення процесу контролю енергоефективності необхідним є використання аналогових інструментів сигналізації, які базуються на аналізі виходу значень змінної за деякі межі, задані автоматично або енергоменеджером. Враховуючи ієрархічність СТС та проблеми контролю енергоефективності ІС можуть бути задані в різних комбінаціях [331]: верхній (High) і вище верхнього (High High); нижній (Low) і нижче нижнього (Low Low); відхилення від норми (Deviation) тощо. При цьому, необхідно виконати фільтрацію ІС залежно від об'єкту дослідження, типу задачі дослідження, призначення та типу контрольованих параметрів, пріоритету та комбінації самих інструментів, типу сигналу, індивідуальні налаштування значень та пріоритетів контрольних меж: мінімальної нижньої межі («Lo-Lo»), нижньої межі («Lo»), верхньої межі («Hi»), максимальної верхньої межі («Hi-Hi») тощо; а також вказівки щодо використання кожної з цих меж та ідентифікації тривоги.

Налаштування ІС та організація повідомлення енергоменеджера про перевищення нормативу електроспоживання (табл. 5.3) враховує особливість побудови самого нормативу, встановленого як довірчий інтервал до очікуваного електроспоживання, межі якого є контрольними [87].

Таблиця 5.3 – Налаштування інструментів сигналізації та ідентифікації тривоги під час контролю електроспоживання

Тип ІС	Значення контрольної межі	Характер повідомлення	Тип сигналу
«Hi»	$\bar{W} + 2\sigma_W$	Перевитрата електроенергії	Сигналізація
«Lo»	$\bar{W} - 2\sigma_W$	Економія електроенергії	Повідомлення

Налаштування ІС та організація повідомлення енергоменеджера про перевищення нормативів технологічних параметрів або показників ефективності режиму роботи об'єкту водопостачання визначається властивостями самого контрольованого параметру та характером його впливу на ефективність електроспоживання.

вання і повинне виконуватись індивідуально по кожному параметру. При цьому, тип сигналу визначається пріоритетністю параметра за інтенсивністю його впливу ефективність електроспоживання та режиму роботи об'єкта.

Слід зазначити, що залежно від досягнутого рівня ефективності електроспоживання та завдань щодо його підтримання чи підвищення можуть змінюватись пріоритети контрольних меж, а отже й налаштування ІС.

Розглянемо способи налаштування ІС на прикладі питомого електроспоживання, який є дестимулятором. В загальному випадку рівень енергоефективності повинен відповідати зеленій зоні. Налаштування ІС має бути таким, щоб повідомляти енергоменеджера про появу значень питомого електроспоживання в червоній зоні (над CL). Враховуючи особливості побудови КК, спостережені значення контрольованого параметру коливаються навколо середньої лінії. Завданням контролю енергоефективності є виявлення та попередження значних коливань питомого електроспоживання в бік значень вищих за CL [45, 87].

Для контролю відхилень питомого електроспоживання використовується ІС типу High та High High. Його налаштування здійснюється на основі меж побудованих зон енергоефективності. Можливими є два варіанти налаштування повідомлення про негативні тенденції в динаміці питомого електроспоживання під час контролю (табл. 5.4). Другий варіант є менш жорстким.

Таблиця 5.4 – Способи налаштування інструменту сигналізації для питомого електроспоживання

Спосіб	Тип ІС	Контрольна межа	Значення контрольної межі	Тип сигналу
І спосіб	«Hi»	Середня лінія	\bar{w}	Попередження
	«Hi-Hi»	Верхня межа зони С	$\bar{w} + \sigma_w$	Сигналізація
II спосіб	«Hi»	Верхня межа зони С	$\bar{w} + \sigma_w$	Попередження
	«Hi-Hi»	Верхня межа зони В	$\bar{w} + 2\sigma_w$	Сигналізація

Постійне удосконалення об'єкту дослідження та режимів його роботи буде забезпечувати звуження діапазонів енергоефективності. Налаштування ІС залежатиме від досягнутого рівня енергоефективності та поставлених завдань щодо його підвищення.

5.5.3 Урахування результатів бенчмаркінгу під час налаштування інструментів сигналізації в системі контролю ефективності електроспоживання

Використання бенчмаркінгу дає можливість проаналізувати ефективність електроспоживання відносно кращого об'єкту. Одним із способів здійснення такого аналізу є використання в якості зразка зон енергоефективності кращого об'єкту та їх накладання на графік питомого електроспоживання контрольованого об'єкту [20, 33]. Результати порівняльного аналізу та завдання щодо підвищення рівня енергоефективності вимагають відповідного налаштування ІС [45]. Якщо результати бенчмаркінгу засвідчують вихід контрольованого параметру за допустимі межі та незадовільний рівень енергоефективності у порівнянні з кращим зразком, то на першому етапі забезпечення удосконалення стану об'єкту необхідним є фіксування моментів досягнення вищого рівня енергоефективності (табл. 5.5).

Таблиця 5.5 - Налаштування інструменту сигналізації з урахуванням результатів бенчмаркінгу

Етап	Тип ІС	Контрольна межа	Тип сигналу
I етап	«Lo»	Верхня межа зони А	Повідомлення про досягнення вищого рівня
II етап	«Lo»	Верхня межа зони В	Повідомлення про досягнення вищого рівня
	«Hi»	Верхня межа зони А	Сигналізація
III етап	«Lo»	Верхня межа зони С	Повідомлення про досягнення вищого рівня
	«Hi»	Верхня межа зони В	<i>Попередження</i>
	«Hi-Hi»	Верхня межа зони А	Сигналізація
IV етап	«Lo»	Середня лінія	Повідомлення про досягнення вищого рівня
	«Hi»	Верхня межа зони С	<i>Попередження</i>
	«Hi-Hi»	Верхня межа зони В	Сигналізація

Після появи стійкої тенденції підвищення рівня енергоефективності можливе встановлення нового завдання щодо підвищення рівня ефективності електроспоживання, тобто, перехід до наступного етапу налаштування ІС про перевищення допустимих меж. Поступове удосконалення ефективності функціонування об'єкту дозволяє встановлювати більш жорсткі налаштування.

5.6 Висновки до розділу

1. Комплексний контроль енергоефективності об'єктів водопостачання, який базується на сукупному аналізі динаміки електроспоживання, параметрів технологічного процесу, показників енергоефективності, забезпечує можливість отримання інформації не лише про ефективність електроспоживання об'єктів, а й ефективність організації технологічного процесу водоподачі, а також виявлення тенденції до погіршення (покращення) рівня енергоефективності. При цьому, необхідно здійснювати контроль відповідності фактичного режиму роботи об'єкту контролю потребам технологічного процесу, що характеризується певною циклічною мінливістю через вплив зовнішніх чинників, тобто, налаштування процедур контролю повинне здійснюватися з урахуванням фактичних умов роботи об'єкту водопостачання відповідно до циклічних змін процесу водоподачі.

2. Аналіз особливостей застосування контрольних карт дає змогу стверджувати, що для здійснення комплексного контролю ефективності електроспоживання необхідним є поєднання різних інструментів контролю. Для контролю електроспоживання доцільним є безпосереднє порівняння фактичних обсягів споживання електроенергії із запланованими значеннями, встановленими на підставі довірчих інтервалів до математичної моделі електроспоживання. Для контролю визначальних змінних з метою виявлення причин недотримання БРЕ – карт Шухарта або Хотеллінга, рішення про вибір яких слід приймати на основі оцінки кореляцій між параметрами і перевірки їх значимості. Для перевірки виконання вимог стандартів серії ISO 50000 щодо постійного удосконалення технологічної системи та підвищення її рівня енергоефективності необхідно виконувати контроль показників енергоефективності, зокрема, питомого електроспоживання, а як інструмент контролю доцільно застосувати карти Шухарта.

3. Запропонована процедура контролю ефективності електроспоживання заснована на спільному застосуванні та аналізі контрольних карт, побудованих для електроспоживання, технологічних параметрів і показників енергоефективності технологічного процесу, передбачає врахування фактичних умов роботи об'єкту

водопостачання під час встановлення нормативів для контрольованих параметрів, а також контроль відповідності його фактичного режиму роботи запланованому. Це забезпечує коректне виявлення не лише моментів неефективного електроспоживання, а й причин, які його зумовили, дає змогу зробити висновок щодо ефективності організації режиму роботи об'єкту, а також виявити тенденції до покращення / погіршення рівня енергоефективності, тобто, наявність / відсутність удосконалення функціонування об'єктів водопровідного господарства.

4. Встановлення характеру впливу показників на ефективність електроспоживання та їх розподіл на основі кореляційного аналізу на стимулятори та дестимулятори забезпечує відповідну інтерпретацію карт Шухарта, побудованих для технологічних параметрів або показників ефективності режиму роботи. Для дестимуляторів зоною незадовільного (неефективного) стану слід вважати діапазон контрольної карти над верхньою контрольною межею, а для стимуляторів – під нижньою. Це є основою інтерпретації зон енергоефективності.

5. Для урахування впливу кліматичних чинників на процес водоподачі, зокрема, аномально високих температур, процедура контролю передбачає урахування результатів коригування планового значення добової витрати води та профіля її добового графіка для коригування (за потреби) планових меж зміни визначальних змінних та урахування відкоригованих прогнозних значень добової витрати води та її характеристик під час визначення БРЕ для забезпечення коректних результатів контролю. Інструментом виявлення необхідності такого коригування є побудова КК для кліматичних чинників з урахуванням даних метеорологічних спостережень, що забезпечує виявлення в розташуванні даних невідповідних структур спеціального типу, поява яких свідчатиме про необхідність коригування процедури планування визначальних змінних та результатів перевірки відповідності фактичного та запланованого режимів роботи об'єкту водопостачання.

6. Урахування в процедурі контролю кращих зразків енергоефективності, вибраних зважаючи на практично можливе досягнення встановлених орієнтирів для підвищення рівня енергоефективності, тобто, фактичного стану об'єкту з точки зору енергоефективності, є практичним інструментом інтеграції результатів

бенчмаркінгу енергоефективності та постійного удосконалення об'єкту водопостачання.

7. Виявлення моментів зміни умов роботи об'єкту водопостачання, зумовленого впливом сезонних чинників, що передбачає контроль процесу прогнозування добової витрати води з мережі водопостачання, у поєднанні із процедурою виявлення розладнання процесу планування електроспоживання, зумовленого удосконаленням ефективності процесу водоподачі, сприяє виявленню моментів, коли математична модель електроспоживання об'єкту водопостачання повинна бути переглянута та відкоригована, тобто, забезпечує можливість контролю відповідності базового рівня електроспоживання фактичним умовам режиму роботи об'єкту водопостачання.

8. Налаштування інструментів сигналізації, які базуються на аналізі виходу значень контрольованої змінної за задані енергоменеджером або автоматично межі, та організація повідомлення енергоменеджера про перевищення нормативів контрольованих параметрів визначається властивостями контрольованого параметру, характером його впливу на ефективність електроспоживання і повинне враховувати особливості побудови нормативів та виконуватись індивідуально по кожному параметру. При цьому, більш або менш жорстке налаштування ІС дозволяє врахувати фактично досягнутий рівень ефективності електроспоживання об'єкту водопостачання та завдання щодо його підтримання чи підвищення.

Розділ 6

МЕТОДОЛОГІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
БАГАТОРІВНЕВОГО КОМПЛЕКСНОГО МОНІТОРИНГУ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА
ТА ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ ІНТЕГРУВАННЯ ЙОГО ПРОЦЕДУР

Забезпечення надійного виконання завдань по водопостачанню з мінімальними витратами можливе лише за умови комплексного підходу до задач підвищення рівня енергоефективності об'єктів водопостачання, управління режимом електроспоживання на всіх ієрархічних рівнях ВГ [29]. Це вимагає впровадження системи комплексного моніторингу показників, що відображають співвідношення витрат електроенергії стосовно окремих установок, технологічного процесу та СКВ в цілому [25]. В даний час відсутня єдина методика проведення моніторингу енергоефективності об'єктів ВГ. Відсутність єдиної інформаційно-аналітичної бази ускладнює проведення реального аналізу енергоефективності не лише окремих підприємств водопостачання, але й галузі в цілому.

6.1 Методологічні основи організації комплексного та багаторівневого моніторингу енергоефективності водопровідного господарства

6.1.1 Інтеграція процедур бенчмаркінгу та моніторингу енергоефективності

Моніторинг енергоефективності - це комплекс заходів, спрямованих на реалізацію основних його функцій: спостереження, оцінювання стану об'єкту, прогнозування та контролювання, конкретизованих специфікою об'єкту дослідження та поставленими задачами. Для забезпечення ефективного управління енергоспоживанням об'єктів ВГ шляхом реалізації основних функцій моніторингу енергоефективності необхідним є застосування низки відповідних підходів та методів, які дозволяють врахувати умови вихідного стану та особливості функціонування об'єктів водопостачання; технічні, технологічні, енергетичні показники, що мають вплив на ефективність електроспоживання; забезпечують виявлення джерел

нераціональних витрат електроенергії та негативних тенденцій; сприяють, як наслідок, прийняттю дієвих рішень щодо підвищення енергоефективності всієї системи комунального водопостачання та її структурних елементів [38, 68]. Процес управління ефективністю електроспоживання в СКВ вимагає проведення моніторингу функціонування її об'єктів, подання даних моніторингу у формі, зручній для прийняття рішень, а також розроблення математичних моделей електроспоживання, налаштування процедур контролю енергоефективності та підтримки прийняття рішень. Особливості (цілі, завдання, об'єкти тощо) системи управління зумовлюють додаткові вимоги до способу виконання моніторингу, а також системи показників енергоефективності, які підлягають моніторингу [72]. Отже, відповідно до ієрархічної структури ВГ повинні бути визначені межі моніторингу [25]: нижній рівень (насосна установка); середній рівень (насосна станція, водозабір); верхній рівень (підприємство); рівень регіону, галузі. Для кожного рівня необхідним є формування наборів показників для моніторингу, які мають відповідати завданням управління кожного рівня. При цьому необхідне врахування вимог до підтримання основних показників водопостачання на різних рівнях; характеристик витрат електроенергії на кожен процес з виявленням визначальних факторів; динаміки процесу електроспоживання [18]. Для забезпечення вимог стандартів серії ISO 50000 необхідно враховувати циклічні зміни процесу водопостачання, зумовлені впливом на водоспоживання сезонних і соціальних чинників, та фактичні умови роботи об'єкту дослідження. Це в свою чергу, потребує організації моніторингу водоспоживання та формалізації впливу на режим водоподачі чинників зовнішнього середовища.

Отже, організація моніторингу енергоефективності об'єктів ВГ потребує послідовного виконання певних дій згідно з алгоритмом, наведеним на рис. 6.1.

Здійснення кожної функції моніторингу потребує урахування особливостей функціонування об'єкту дослідження залежно від його ієрархічного рівня та постановки задачі дослідження [76]. Сформулюємо загальні принципи реалізації функцій моніторингу, які є основою формування інформаційного простору системи моніторингу енергоефективності ВГ.

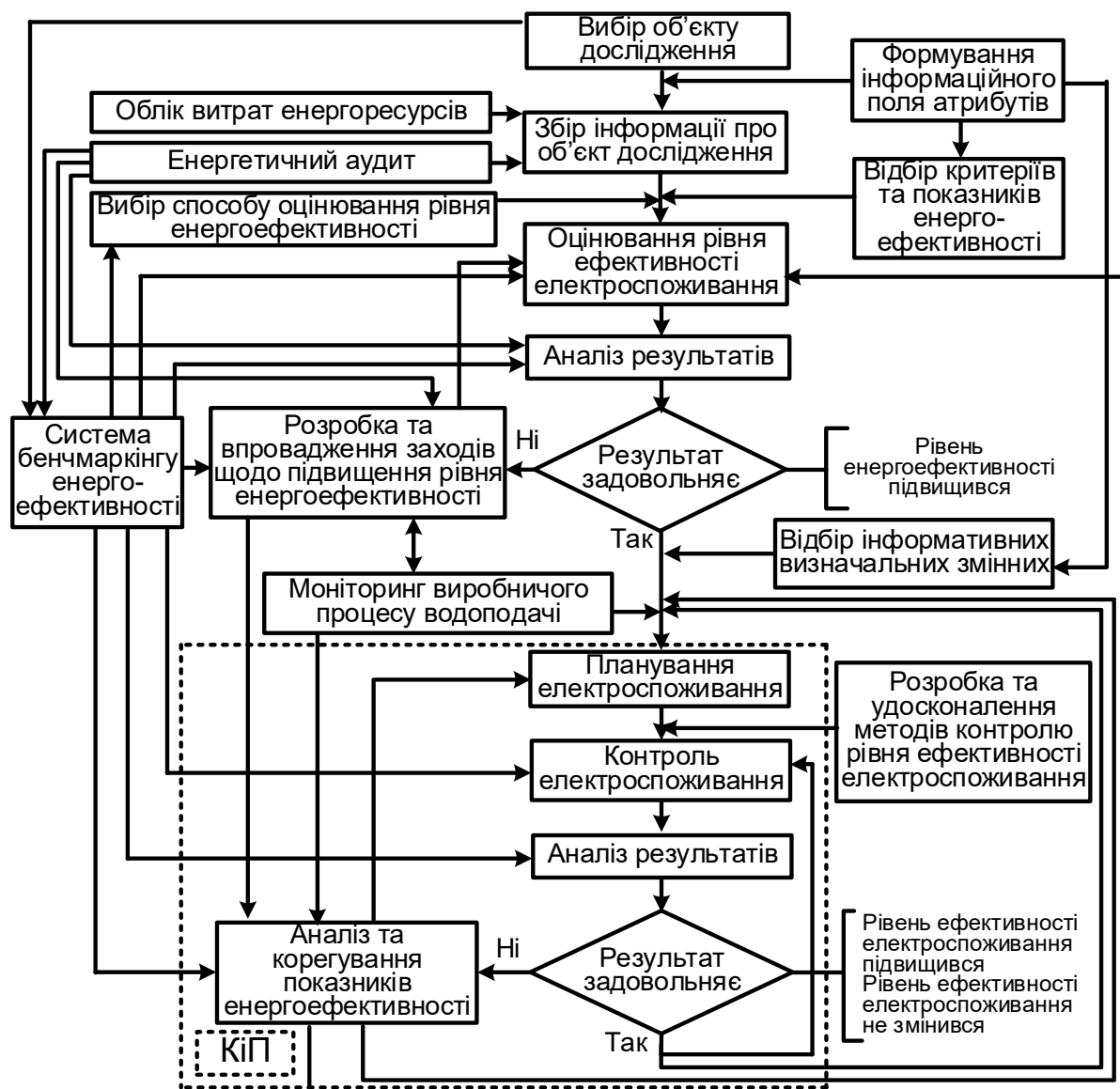


Рисунок 6.1 – Алгоритм інтеграції бенчмаркінгу та моніторингу енергоефективності об'єктів ВГ

1. Спостереження та збір даних. Для аналізу ситуації на об'єкті дослідження та оцінки рівня енергоефективності необхідні об'єктивні показники, джерелом яких має стати система моніторингу, побудована на сучасних системах обліку, збору, зберігання і обробки даних. Розвиток систем обліку енергоспоживання та автоматизованого управління технологічними процесами дозволяють отримувати та зберігати великий обсяг інформації про параметри і режими роботи технологічного обладнання, технологічні параметри процесу водоподачі, електроспоживання. Під час проведення моніторингу виникає необхідність одержання інформації, репрезентативної щодо різних об'єктів: агрегат, структурний елемент,

технологічний процес, ієрархічний рівень, виробництво, підприємство, галузь.

2. Оцінювання рівня енергоефективності слід виконувати з урахуванням кращих власних показників, кращих показників інших підприємств, середніх показників в галузі [73]. Для реалізації даного завдання доцільним є застосування концепції бенчмаркінгу. Інформація, зібрана в процесі бенчмаркінгу, є основою для підвищення рівня енергоефективності, а також контролю енергоспоживання та результативності прийнятих рішень щодо підвищення енергоефективності.

3. Планування електроспоживання. Обсяги електроспоживання залежать від великої кількості технічних, технологічних, організаційних тощо, а також кліматичних чинників. Моніторинг можна трактувати як аналіз хронології електроспоживання за певний період часу і обґрунтоване визначення БРЕ шляхом прогнозування. При цьому слід попередньо виявити та врахувати особливості функціональних зв'язків між вхідними та вихідною змінними для обраного об'єкту залежно від його ієрархічного рівня. Визначення БРЕ повинне виконуватись з урахуванням реальних умов функціонування об'єкту дослідження.

4. Контроль ефективності електроспоживання. По суті моніторинг енергоефективності являє собою регулярне отримання і аналіз інформації про електроспоживання, динаміку показників енергоефективності, параметри технологічного процесу. Порівняння фактичних значень контрольованих показників з планованими дозволяє виявити незаплановані відхилення та тенденції до погіршення (покращення) ефективності електроспоживання. При цьому, зміни рівня енергоефективності повинні вимірюватися відносно БРЕ, зафіксованого у вихідному енергетичному профілі, а також з урахуванням кращих зразків ефективного електроспоживання. Таким чином, система контролю ефективності електроспоживання на об'єктах ВГ повинна містити [61, 76]:

а) підсистему оперативного контролю ефективності електроспоживання, яка передбачає:

- поточний контроль динаміки водоподачі як домінуючого чинника, який визначає побудову режиму ефективного електроспоживання;
- поточний контроль динаміки показників енергоефективності з пози-

цій їх відповідності певним діапазнам за рівнем енергоефективності;

- контроль дотримання БРЕ;

б) підсистему бенчмаркінгу енергоефективності, яка містить процедури:

- порівняння динаміки показників енергоефективності з аналогічними показниками кращих за рівнем енергоефективності об'єктів з групи однотипних;
- порівняльного аналізу відповідності дійсного режиму електроспоживання БРЕ кращих за рівнем енергоефективності об'єктів з групи однотипних.

З огляду на місце та роль порівняльного аналізу енергоефективності у вирішенні завдань моніторингу [83], бенчмаркінг енергоефективності слід розглядати як складову моніторингу енергоефективності ВГ. Оскільки комплексний моніторинг є одним із необхідних способів підвищення рівня енергоефективності ВГ та його об'єктів, то ця діяльність повинна здійснюватися на постійній основі з урахуванням того, що інформація, отримана в результаті моніторингу, впливає на прийняття управлінського рішення, а отже, і на результат в цілому. Причому, основним принципом функціонування системи моніторингу енергоефективності повинна бути безперервність організації пооб'єктного контролю та урахування отриманої інформації для подальшого удосконалення технологічного процесу та планування режимів ефективного електроспоживання.

Наведені принципи організації моніторингу енергоефективності ВГ та призначення його складових дають підставу застосовувати таке поняття як *комплексний моніторинг енергоефективності*.

6.1.2 Застосування пірамідального та стратифікованого підходів до багаторівневого моніторингу енергоефективності та його інформаційного забезпечення

Моніторинг слід розглядати в двох аспектах: як технологію дослідження та як спосіб інформаційного забезпечення процесу управління енергоспоживанням СТС та її об'єктів.

Згідно [333] математична модель об'єкту дослідження (явища, процесу) є сукупність знань, припущень та гіпотез, побудованих у вигляді цілісної, логічно витриманої несуперечливої структури, яка гомоморфно відображає основні влас-

тивості емпіричного об'єкту, сформульована з використанням математичних об'єктів, термінів та символів і призначена для розв'язання певного класу задач.

Системна модель ВГ з позицій комплексного багаторівневого моніторингу енергоефективності може бути представлена кортежем сукупності елементів $\{E\}$ моніторингу, зв'язків між ними $\{Z\}$ та функцій і завдань $\{F\}$ системи моніторингу енергоефективності ВГ:

$$S = \langle \{E\}, \{Z\}, \{F\} \rangle. \quad (6.1)$$

Модель елементів складається із сукупності інформаційних засобів $\{I\}$, до яких належать програмні засоби, бази знань та експертні рішення, технічних засобів $\{T\}$ і низки інших елементів $\{P\}$:

$$\{E\} = \langle \{I\}, \{T\}, \{P\} \rangle. \quad (6.2)$$

Зв'язки між елементами системи моніторингу можуть бути описані сукупністю інформаційних $\{IR\}$, енергетичних $\{ER\}$, гідравлічних $\{HR\}$ та низки інших $\{PR\}$ зв'язків:

$$\{Z\} = \langle \{IR\}, \{ER\}, \{HR\}, \{PR\} \rangle. \quad (6.3)$$

Система інформаційно-методичного забезпечення задач моніторингу енергоефективності ВГ як СТС є сукупністю різних видів первинної інформації і методик, що забезпечують отримання вторинної інформації, необхідної для вирішення поставлених задач. Первинною є інформація, що характеризує досліджуване явище на рівні технологічних установок, процесів, виробництв, вторинною – узагальнена характеристика (агрегований показник) досліджуваного явища, результат обробки первинної інформації. Інформація може бути зовнішньою (відомості, що надходять з різних ланок управління і є підставою для постановки і вирішення конкретних задач) та внутрішньою (дані про технологічний процес: фактичні показники енергоспоживання, характеристика стану технологічного устаткування, параметри режиму роботи обладнання тощо) [18]. Методики включають загальні положення вирішення досліджуваного питання і виконання різного роду робіт по збору, відбору, обробці і представленню інформації для розв'язку конк-

ретних задач. Отже, комплексний моніторинг базується на побудові деякої системи, що включає множину завдань F ($F \in \Phi$), що відповідають глобальній меті G та які реалізовує множина розрахункових процедур $M = \{M_1, \dots, M_r\}$. Для кожної розрахункової процедури M_i існує низка відповідних істотних характеристик (показників енергоефективності, визначальних змінних, контрольованих параметрів тощо) $X_i = \{x_1, \dots, x_m\}$, де m – число характеристик методу i .

Зважаючи на ієрархічність ВГ та проблеми енергоефективності, структура комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів ВГ також є ієрархічною (рис. 6.2).



Рисунок – 6.2 – Ієрархічна структура комплексного моніторингу

Реалізації ієрархічної структури комплексного моніторингу енергоефективності базується на принципах декомпозиції проблеми енергоефективності. Стратифіковане уявлення дозволяє організувати взаємодію між структурами цілей різних рівнів. Дослідження проблеми стратифікованих уявлень показали [192], що структури цілей і функцій на кожній страті можуть бути сформованими за різними логічними принципами (тобто за допомогою різних методик структуризації), навіть з використанням різних видів структур. Таким чином, глобальна мета може і не переформулюватися на нижчій страті, крім того, на цій страті різні вітки вирішення задачі вищого рівня можуть формуватися різними підзадачами і не бути зв'язаними на своєму рівні (по горизонталі), хоча можуть існувати і горизонтальні взаємозв'язки. Для кожного рівня проблеми енергоефективності існують свої цілі і завдання, своя структура підпроблем, а значить і деяка множина істотних

характеристик, яка забезпечує достатній ступінь деталізації для даного рівня [54]. Структурованість інформаційного набору забезпечить зручність пошуку і фіксації інформації і додає моніторингу властивості інформаційного процесу.

Інформаційно-аналітична система (ІАС) - комплекс апаратних, програмних засобів, інформаційних ресурсів, методик, які використовуються для забезпечення автоматизації аналітичних робіт з метою обґрунтування прийняття управлінських рішень та інших можливих застосувань [334, 335]. Отже, сукупність розрахункових процедур моніторингу, методів їх реалізації, наборів істотних характеристик та процедур формування вибірок їх значень, способів збору та обробки інформації тощо утворюють ІАС комплексного моніторингу. При цьому необхідним є вирішення низки завдань: формування набору вхідних змінних та критеріїв з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження та формулювання задачі, формування наборів репрезентативних вибірок даних, застосування математичних підходів для встановлення відповідних математичних залежностей між змінними на основі експериментальних даних, проведення оцінки якісних та кількісних параметрів тощо. Тобто, розв'язок будь-якої із задач моніторингу можна представити набором процедур (рис. 6.3)

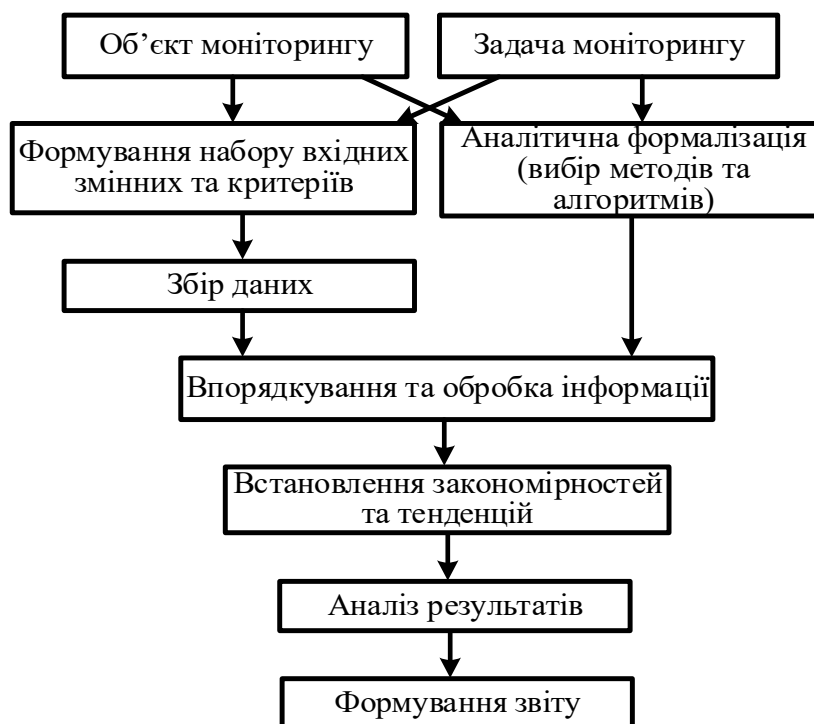


Рисунок 6.3 – Механізм реалізації функцій моніторингу

Рисунок 6.3 демонструє один з головних елементів системи моніторингу –

механізм його проведення. Під механізмом моніторингу мається на увазі сукупність способів, правил найбільш доцільного виконання будь-якої його задачі. Всі елементи системи моніторингу знаходяться між собою в певній залежності, взаємозв'язані та ієрархічно вибудовані.

Реалізації ієрархічної структури ІАС комплексного моніторингу енергоефективності також базується на методі декомпозиції. На кожному рівні ієрархії розв'язуються задачі відповідної складності, які характеризуються як одиницями інформації, так і алгоритмами обробки даних [336]. При цьому, на вищих рівнях ієрархії одиниці інформації, алгоритми, програмні та апаратні засоби являють собою впорядковані сукупності одиниць інформації та композиції алгоритмів, програмних і апаратних засобів нижчих рівнів ієрархії.

Таким чином, систему комплексного моніторингу слід розглядати як інформаційну базу, що є елементом інформаційного забезпечення діагностики та прогнозування стану ефективності електроспоживання об'єктів ВГ, запорукою визначення можливостей мінімізації негативних наслідків та отримання істотних з точки зору підвищення енергоефективності результатів.

6.2 Концептуальні засади побудови інформаційного простору та інформаційного поля комплексного моніторингу енергоефективності

6.2.1 Тракткування інформаційного простору

ВГ як СТС можна представити з одного боку об'єктом як єдине ціле, з іншого боку як сукупність (множину) пов'язаних між собою і взаємодіючих складових частин - об'єктів, але меншого масштабу. Інформаційне відображення фізичного об'єкту або процесу утворює інформаційний об'єкт [334]. Сукупність інформаційних об'єктів, що інформаційно відображають властивості складної системи і процеси, що протікають в ній, утворюють інформаційний простір (ІПр) [334].

Структурними складовими ІПр є інформаційні поля, що являють собою сукупність всієї інформації, зосередженої в даному обсязі простору-часу, та інформаційні потоки - сукупність даних, які переміщаються в просторі по каналах ко-

мунікації [335]. Основними технологічними компонентами (об'єктами) ІПр є: інформаційні ресурси (сукупність даних, організованих для ефективного отримання достовірної інформації); засоби і технології інформаційної взаємодії (програмні комплекси та алгоритми); інформаційна інфраструктура (середовище, яке забезпечує можливість збору, передачі, зберігання, автоматизованої обробки інформації) [335]. Отже, в організаційно-технічному аспекті ІПр є ІАС, що здійснює передачу, обробку та зберігання інформації з використанням технічних засобів тощо.

Характерною властивістю ІПр будь-якої СТС, а отже й комплексного моніторингу енергоефективності, є його структурованість. Таким чином, повинні бути виділені інформаційні елементи простору, встановлені зв'язки між ними, введені необхідні позначення, всі елементи і зв'язки впорядковані [334].

Структури будь-яких складних систем будуються з використанням ієрархічного та функціонального принципів виділення підсистем. Як наслідок системи управління ефективністю електроспоживання кожного ієрархічного рівня ВГ представляють собою підсистеми в системі більш високого рівня [22, 54]. Кожен рівень характеризується своїми особливостями цілей та операцій, пов'язаних з обробкою даних [336]. Таким чином, ІПр як ІАС являє собою впорядковану сукупність інформаційних ресурсів (баз і банків даних) та інформаційних технологій їх супроводу та використання, в тому числі, інтелектуальних інформаційних технологій (тобто, прийомів, способів і методів виконання функцій збору, зберігання, обробки, передачі і використання знань [338]), що реалізують інформаційні процеси (отримання вхідних даних, обробку цих даних, видачу результату) з урахуванням ієрархічного рівня вибраного об'єкту та задачі моніторингу.

6.2.2 Складові інформаційного поля моніторингу енергоефективності

Побудова інформаційного поля передбачає формалізований опис об'єктів предметної області за допомогою комплексу властивих для них показників та функціональних зв'язків шляхом використання певних прийомів опису [339].

Інформаційним полем моніторингу енергоефективності ВГ є спеціальним чином організована сукупність атрибутів (показників) його складових, які разом з

кількісними та якісними значеннями (параметрами цих атрибутів) дозволяють відрізнити один об'єкт від іншого [339]. Об'єктом моніторингу енергоефективності є один з структуруючих елементів, виділених за функціональною ознакою (насосний агрегат, насосна станція, технологічний процес, водозабір тощо). Функціональний стан кожного об'єкта визначається значеннями кількісних характеристик - параметрів (показників) функціонування. Поведінка об'єкта описується змінами в часі його стану за встановлений інтервал (розрахунковий період) часу. Кожен об'єкт однозначно характеризується сукупністю статичних властивостей і динамічних параметрів функціонування об'єкта, які змінюються за часом [339]. Для забезпечення своєї діяльності об'єкт пов'язаний різними зв'язками з іншими об'єктами. Таким чином, до складу базових елементів-сутностей входять: об'єкти; типи об'єктів; типи підпорядкованості (зв'язку) об'єктів; параметри; типи параметрів; типи властивостей параметрів; типи приналежності (функціонального взаємозв'язку) параметрів до об'єктів.

Моделюючи алгоритми розрахункових процедур для реалізації механізму моніторингу енергоефективності застосовуються для встановлення взаємозв'язків різних параметрів на підставі правил їх продукційного подання. Алгоритми реалізуються за допомогою схем розрахунку, обчислення значень параметрів для встановленого інтервалу часу, тверджень продукційних правил обчислення значень параметрів, формул і операндів [340].

Таким чином, до складу функціональних елементів-сутностей ІІр моніторингу енергоефективності входять: схеми, правила, алгоритми, варіанти розрахунків; результати виконання розрахунків; форми підготовки звітних документів.

Всі вхідні та вихідні дані інформаційного поля комплексного моніторингу енергоефективності ВГ представляються у вигляді інформаційних блоків і підрозділяються на блоки даних про [41, 55]: об'єкти; параметри об'єктів; алгоритми розрахунків; результати розрахунків; форми звітних документів.

Вибір базових (вхідних даних) та функціональних (процедур-алгоритмів) елементів-сутностей визначається не лише функціональними ознаками об'єкта предметної області, а й залежить від конкретизації задачі дослідження. Кожна фу-

нкціональна задача характеризується вхідними даними (потокм даних), вихідними даними (потокм результатів) та методами опрацювання (інтеграції та представлення) [337]. Для кожного об'єкту можуть існувати свої (не властиві для інших об'єктів) процедури-алгоритми розрахунку, результати яких використовуються в алгоритмах об'єктів вищого рівня. В той же час існують процедури-алгоритми розрахунку властиві всім об'єктам предметної області, незалежно від рівня їх ієрархічної приналежності.

Для реалізації вирішення задач комплексного багаторівневого моніторингу енергоефективності перспективним є підхід, заснований на інформаційній технології, яка представляє собою гнучкий, високоавтоматизований, здатний переналаштовуватись простір моделей інформаційних процесів, що дозволяє неперервно удосконалювати створення інформаційної системи, підтримувати актуальність інструментальних засобів та стандартів, а також розвивати та удосконалювати саму систему моніторингу [337, 339, 341]. Інформаційна складова повинна забезпечувати: формування чітко визначеної структури даних, в межах якої створюються інформаційні моделі завдань і об'єктів предметної області, задач обробки інформації та інтерпретації їх результатів; враховувати особливості реалізації аналітичних та прогнозних розрахунків, операцій з обробки даних [337, 340]. Функціональна складова технології повинна забезпечувати створення та функціонування всієї сукупності математичних моделей розрахунково-аналітичних завдань, логічно та інформаційно взаємопов'язаних між собою за цільовим призначенням, розрахунковими вхідними та вихідними даними [337].

6.3 Структуризація атрибутів-характеристик енергоефективності об'єктів комплексного моніторингу

6.3.1 Формування вихідного поля атрибутів-характеристик енергоефективності стану об'єкту моніторингу

Енергоефективність як ознака, що відображає потенційну властивість об'єкта оцінювання, належить до числа характеристик, які безпосередньо не спостері-

гаються і не вимірюються, тобто є прихованими, латентними. Загальне уявлення про ступінь появи аналізованої латентної властивості формується як результат підсумовування певних часткових характеристик, що впливають на цю властивість. Отже, першим є завдання виявлення критеріїв роботи (технологічної системи та її структурних елементів, підприємства, галузі в цілому), які можуть охарактеризувати рівень енергоефективності [21], та формування системи характеристик ефективності енергоспоживання, здатних в сукупності дати досить повне уявлення про вимірювану латентну ознаку - енергоефективність об'єктів. Під системою характеристик енергоефективності слід розуміти комплекс взаємопов'язаних критеріїв, показників, наборів вхідних та вихідних змінних, що характеризують істотні сторони проблеми енергоефективності об'єкту дослідження та пов'язані між собою логічною єдністю, кількісними та функціональними залежностями [29, 30]. Отже, кожен об'єкт ВГ має бути однозначно описаний множиною характеристик енергоефективності. При цьому, необхідно чітко розрізняти орієнтири об'єкту дослідження залежно від його ієрархічного рівня щодо досягнення своїх цілей.

У загальному випадку, кожен об'єкт предметної області повинен бути представлений у вигляді сукупності (кортежу) [22, 30, 54, 55]:

$$Sub_{def} \equiv \langle name, St, Fn \rangle, \quad (6.4)$$

де *name* - назва об'єкта предметної області;

St - множина характеристик енергоефективності вихідного стану;

Fn - множина характеристик енергоефективності функціонування.

Кожна з характеристик енергоефективності має факторну приналежність, тобто вони утворюють: кліматичні, технічні, технологічні, енергетичні, експлуатаційні чинники. Це дозволяє представити сукупності і у вигляді кортежу відповідних чинників [30, 54, 55]:

$$St = \langle Cl, Thn, Thl, Pw \rangle; \quad (6.5)$$

$$Fn = \langle Thn, Thl, Pw, Op \rangle, \quad (6.6)$$

де *Cl* – множина характеристик енергоефективності X_{cl} , властивих для пев-

ного об'єкта предметної області, що створюють кліматичний фактор;

Thn , Thl , Pw , Op – аналогічно, технічний, технологічний, енергетичний, експлуатаційний чинник:

$$\begin{aligned} Cl &= \{X_{cl1}, X_{cl2}, \dots, X_{clm}\}; \\ Thn &= \{X_{thn1}, X_{thn2}, \dots, X_{thnn}\}; \\ Thl &= \{X_{thl1}, X_{thl2}, \dots, X_{thlg}\}; \\ Pw &= \{X_{pw1}, X_{pw2}, \dots, X_{pwj}\}; \\ Op &= \{X_{op1}, X_{op2}, \dots, X_{opq}\}. \end{aligned} \quad (6.7)$$

Кожен з показників X описано кортежем:

$$X = \langle name, \{value\} \rangle, \quad (6.8)$$

де $name$ - назва; $\{value\}$ - область значень.

Таким чином, кількісними атрибутами-характеристиками об'єкту моніторингу є технічні та технологічні параметри, енергетичні характеристики та показники енергоефективності, які описують ефективність його вихідного стану та організації режиму роботи [55]. Отже, інформаційне поле моніторингу енергоефективності ВГ складається з низки інформаційних блоків: блок показників виробництва [342]; блок показників електроспоживання; блок вихідних характеристик (паспортних даних) технічного стану об'єктів водопостачання; блок показників, що характеризують ефективність технічного стану об'єктів водопостачання; блок показників, що характеризують ефективність організації технологічного процесу водопостачання; блок показників ефективності енергоспоживання [30].

6.3.2 Урахування пірамідального та стратифікованого підходів для побудови структурованого інформаційного поля комплексного моніторингу

Після формування атрибутів-характеристик енергоефективності об'єкту моніторингу виникає необхідність зниження його розмірності. Нехай, отримано скінченний k -вимірний вектор характеристик $X_0 = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$, що описують

об'єкт моніторингу. Необхідно здійснити відбір інформативних характеристик енергоефективності та формування такого (достатньо повного) їх набору, який би забезпечував вирішення деякої задачі F_j моніторингу енергоефективності ($F_j \in F$, $j=1, \dots, g$, де g – кількість підзадач проблеми енергоефективності) та необхідний рівень достовірності отриманих результатів. Тобто, з характеристик вектора $X_0 = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$ розмірності k , необхідно відібрати m найбільш інформативних, причому $m \leq k$, сукупність яких $x = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ (де $x_i \in X_0$, $i=1, \dots, m$) повинна задовольняти такі вимоги: бути достатньо інформативною; містити мінімально необхідну кількість змінних з метою мінімізації складності процедур-алгоритмів. Таким чином, задача відбору інформативних характеристик енергоефективності для вирішення поставленого завдання моніторингу F_j зводиться до відображення однієї множини в іншу: $X_0 \rightarrow x \forall F_j \in F$.

Згідно концепції пірамідального підходу формування сукупності характеристик енергоефективності потребує врахування ієрархічної приналежності вибраного об'єкту дослідження. Формування множини характеристик енергоефективності об'єктів нижчого рівня вимагає докладного урахування їх технічних характеристик та особливостей функціонування (паспортних даних агрегатів, відповідності проектних рішень фактичним умовам їх роботи, ефективності організації процесу водоподачі тощо) [54]. На рівні підприємства достатньою є сукупність характеристик, які відображають загальну тенденцію ефективності електроживлення не потребуючи детального врахування характеристик нижчих рівнів. Розподіл характеристик енергоефективності з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження та розгляду проблеми енергоефективності дозволить виключити ті з них, які розглядати не доцільно. Це дозволить отримати структурований набір характеристик, які будуть забезпечувати достатній ступінь деталізації для вибраного рівня постановки проблеми енергоефективності і не будуть потребувати детального опису об'єктів нижчих рівнів [54]. Застосування принципів стратифікованого підходу до проблеми енергоефективності передбачає такий же підхід до формування наборів атрибутів-характеристик енергоефективності об'єктів моніторингу. Отже, формування структурованої сукупності характеристик енергое-

фективності передбачає врахування ієрархічної приналежності вибраного об'єкту дослідження, а також ідентифікації типу задачі дослідження. Тобто, для кожної із підпроблем енергоефективності та задач моніторингу може бути сформований свій набір характеристик енергоефективності. Таким чином, для будь-якої задачі моніторингу енергоефективності є справедливим: $F_j = M_j \cup X_j$. Сформоване таким чином, поле атрибутів-характеристик енергоефективності забезпечить достатньо деталізований опис об'єктів моніторингу в предметній області з урахуванням призначення атрибутів відповідно до постановки задачі дослідження [55].

Слід зазначити, що інтеграція пірамідального та стратифікованого підходів до проблеми енергоефективності ВГ передбачає наявність горизонтальних та вертикальних зв'язків між об'єктами моніторингу, а отже й в інформаційному полі моніторингу енергоефективності. Структуризація проблеми енергоефективності відображається наявністю горизонтальних зв'язків між характеристиками енергоефективності та цільовою характеристикою, що відповідає реалізації різних задач та процедур комплексного моніторингу енергоефективності. Основою забезпечення вертикальних зв'язків та реалізації багаторівневого моніторингу є процедура агрегування певних характеристик енергоефективності та їх параметрів нижчого ієрархічного рівня у відповідні характеристики та їх параметри вищого ієрархічного рівня.

6.3.3 Структуризація атрибутів-характеристик енергоефективності об'єктів комплексного моніторингу на засадах багатокритеріального вибору та експертних оцінок

При формуванні структурованого набору характеристик енергоефективності (критеріїв, показників, визначальних змінних) вирішальну роль відіграють експертні оцінки інформативності окремих характеристик, які ґрунтуються на інтуїції експертів і дозволяють врахувати можливість вимірювання конкретної ознаки, діапазон варіації, трудомісткість збирання інформації [18]. Однак, думки фахівців щодо важливості окремих змінних не будуть однозначними.

Одним із поширених засобів формування набору інформативних характери-

стик енергоефективності для вирішення певної задачі моніторингу залежно від її конкретної постановки є метод експертних оцінок, який дозволяє забезпечити об'єктивність думок фахівців шляхом оцінки їх узгодженості [244]. Суть методу полягає в аналізі результатів опитування щодо впливу характеристик, визначеного шляхом їх ранжування та виділення найбільш інформативних (істотних) на основі поетапної перевірки гіпотез щодо адекватності початкової та переформованої матриць рангів, узгодженості думок експертів, відмінностей в оцінках опитаних експертів, наявності певної структури впливу факторів [244]. Гіпотези будуються в порядку їх убудування, тобто закінчення дослідження на етапі $(g + 1)$ не дає нової інформації, що не міститься в результатах етапів $1, 2, \dots, g$. Позитивна або негативна відповідь означає перехід до наступного етапу дослідження, або ж засвідчує, що продовження його неможливе.

Проте, проблемою під час такого формування сукупності характеристик, які є достовірним відображенням вихідного інформаційного поля, є саме формування початкового набору характеристик, які варто приймати до розгляду. Зокрема, виникає розбіжність думок щодо необхідності внесення характеристики в анкету для ранжування [18, 343], що зумовлює відмінності у переліку характеристик та їх кількості. Причинами такої ситуації є [18]: рівень автоматизації збору статистичної інформації, що зумовлює відповідне ставлення фахівців до можливості визначення певного коефіцієнта чи параметра; спосіб набуття досвіду експерта, який визначається місцем його здобування - ієрархічним рівнем СКВ; типом задач, для розв'язку яких здійснюється відбір інформативних змінних.

Задачу формування сукупності інформативних характеристик енергоефективності доцільно розглядати з позицій багатокритеріального вибору.

Однією з методологічних проблем у теорії багатокритеріального вибору є проблема подолання фактора суб'єктивності в процесі прийняття рішення, яка зумовлена психологічними особливостями поведінки експерта, що можуть зумовлювати помилки, зміщення, викривлення переваг і негативно вплинути на якість рішення, що приймається. Серед способів зниження розмірності ознакового простору та багатокритеріального вибору інформативних характеристик енергоефек-

тивності важливо відзначити методи векторної стратифікації [236], засновані на процедурах побудови структурованого багатокритеріального простору і розбиття його на задане число впорядкованих шарів (страт). Підґрунтям для вибору виступає сукупність відбіркових критеріїв, які агрегуються в складовий критерій, що визначає ступінь впливу характеристики енергоефективності на цільову змінну.

Основою такого вибору є принципи багатокритеріальної порядкової класифікації, яка не потребує ранжування змінних [18]. Достатньо розподілити їх між кількома класами, впорядкованими за ступенем відображення певної властивості [236]. Задача полягає в наступному: задано набір змінних, які необхідно віднести до одного з M впорядкованих класів C_1, \dots, C_M . Кожна змінна, що підлягає класифікації, характеризується комбінацією оцінок за N характеристиками K_1, \dots, K_n , що мають розгорнуті словесні формулювання градацій якості, які впорядковані експертом відповідно до постановки задачі від більш характерної до менш характерної [236, 237, 238]. Вибіркові критерії, запропоновані в [18, 243], характеризують ступінь впливу на процес, ступінь вимірювання та контрольованості, ступінь керованості та змінності (рис. 6.4) та мають шкалу оцінок X_i з трьома вербальними порядковими оцінками 0,1,2, де 0 означає кращу оцінку, 1 – середню, 2 – гіршу. Складовий критерій верхнього рівня характеризує ступінь інформативності змінної, градації оцінок якого (високий, добрий, середній, низький, незадовільний) визначають 5 впорядкованих класів рішень [18, 243]. Для отримання структурованих знань при вирішенні задачі групування визначальних змінних на основі отриманих від експертів оцінок в [18, 243] застосовано шкалу стратифікації – інтервальну шкалу, в якій кожна страта містить певну сукупність змінних, що об'єднані спільними рисами. Використання методу багатокритеріального вибору дозволяє здійснити градацію показників за певними якісними ознаками, які характеризують властивості показників енергоефективності у призмі конкретної задачі, а отже дає змогу уникнути розбіжностей думок експертів щодо доцільності розгляду впливу того або іншого показника на розв'язок поставленої задачі [18].

Структурна класифікація дає змогу перевести інтуїтивні знання експертів та їх вербальні оцінки в певним чином визначені кількісні оцінки, що дозволяє

об'єднати ці оцінки в групи, які мають певне змістове наповнення.

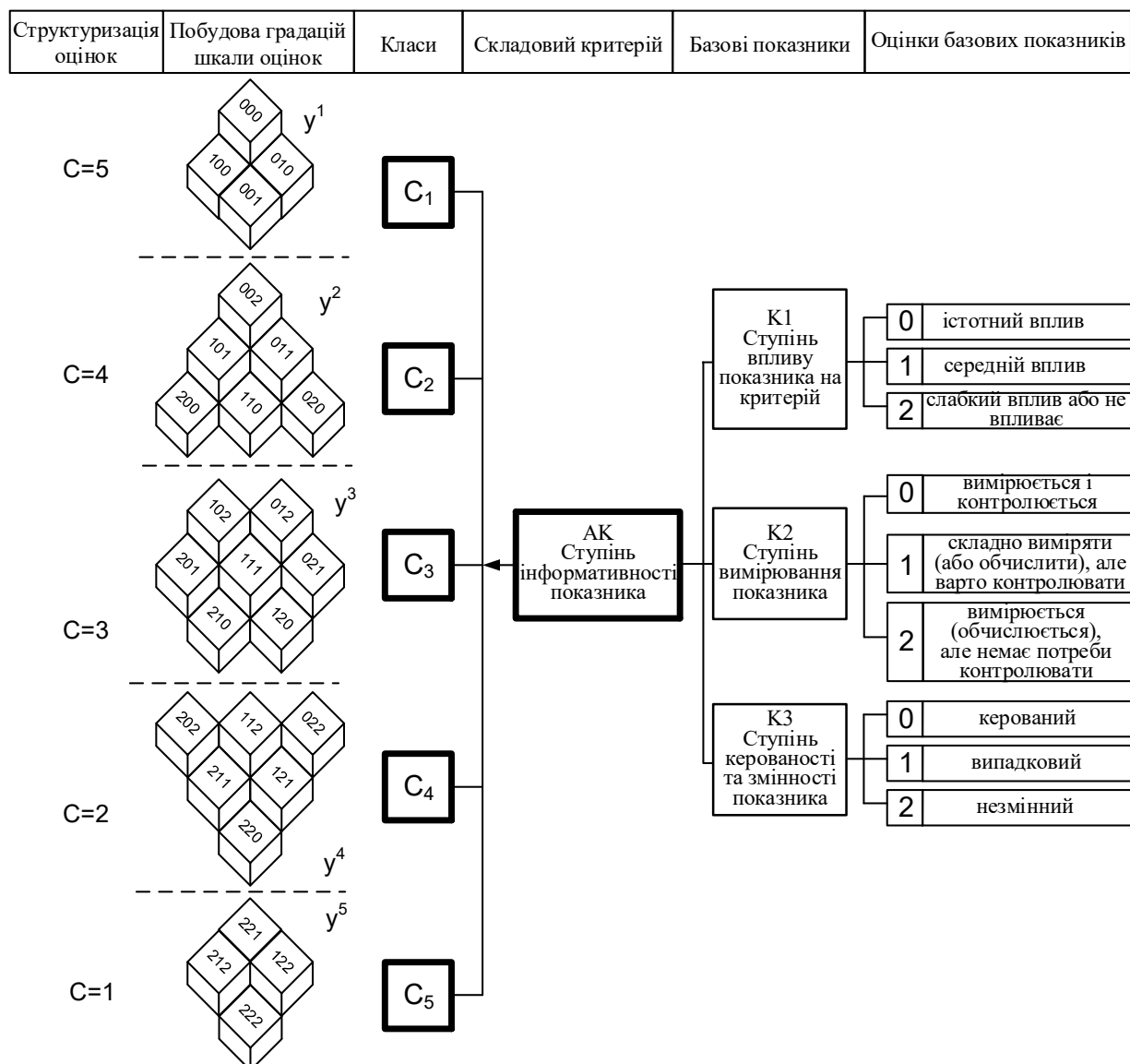


Рисунок 6.4 – Схема багатокритеріальної класифікації атрибутів-характеристик енергоефективності

Для отримання структурованих знань про групи характеристик енергоефективності на основі оцінок, отриманих від експертів, необхідно задати відношення стратифікації, яке для сусідніх елементів однієї страти є толерантністю, а для елементів з різних страт - відношенням строгого порядку. Це означає, що всередині страти сусідні об'єкти, хоча і можуть відрізнятися за деякими властивостями, будуть майже рівноцінними, такими, що не мають якісної відмінності. Об'єкти, що належать до різних страт, мають якісну відмінність і строго впорядковані за ступенем їх відповідності до заданої мети. Для встановлення відношення стратифікації скористаємось шкалою стратифікації – інтервальною шкалою, в якій кож-

на страта містить певну сукупність ознак, що об'єднані спільними рисами. Одній і тій же страті можуть відповідати різні сукупності параметрів об'єкту, які мають однакові оцінки по узагальнюючому критерію.

На основі послідовної класифікації проведеної експертами–фахівцями різного напрямку діяльності та різних ієрархічних рівнів) характеристикам енергоефективності виставляються бали (для параметра що потрапив в клас C_1 ставлять у відповідність 5 балів, в клас C_2 – 4 бали, в клас C_3 – 3 бали, в клас C_4 – 2 бали, в клас C_5 – 1 бал) та обчислюють середню оцінку (середній бал \bar{B}), спираючись на яку будують страти [18, 243]:

5-а страта: $4 < \bar{B} \leq 5$ - характеристики енергоефективності, що однозначно мають істотний вплив і потребують обов'язкового врахування;

4-а страта: $3 < \bar{B} \leq 4$ - характеристики енергоефективності, які мають значний вплив і рекомендовані до врахування;

3-а страта: $2 < \bar{B} \leq 3$ - характеристики енергоефективності, які мають доволі значний вплив і можуть враховуватись;

2-а страта: $1 < \bar{B} \leq 2$ - характеристики енергоефективності, які мають слабкий вплив і можуть не враховуватись;

1-а страта: $\bar{B} \leq 1$ - характеристики енергоефективності, що мають дуже слабкий вплив і не потребують врахування.

На основі отриманих груп характеристик енергоефективності, що характеризують ступінь їх впливу на досліджуваний процес чи цільову характеристику, формується сукупність інформативних характеристик енергоефективності. До сформованої сукупності доцільно застосувати метод експертних оцінок для перевірки узгодженості оцінок експертів за допомогою коефіцієнта конкордації W та значущості коефіцієнта конкордації W за критерієм Пірсона, а також значущості відмінності вибраних характеристик за t – критерієм Стюдента [244]. Формування узгоджених експертних оцінок забезпечує досягнення консенсусу експертних суджень. Головні етапи процедури структуризації характеристик енергоефективності представлено на рис. 6.5.

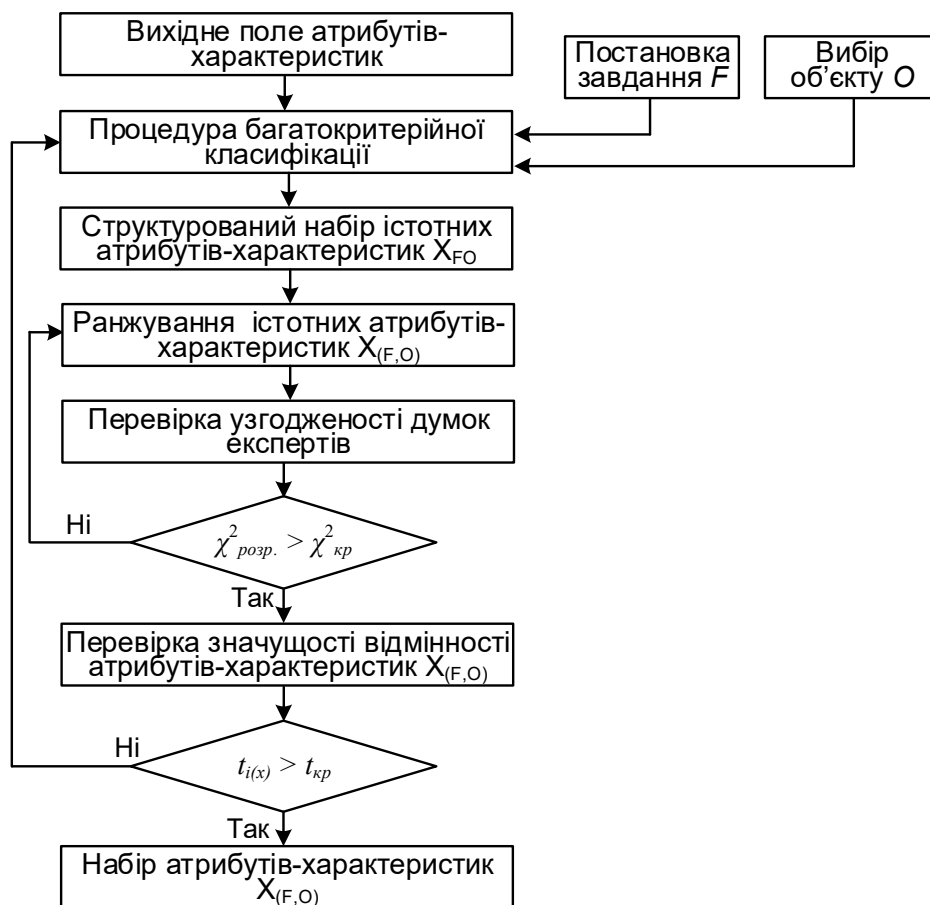


Рисунок 6.5 - Процедура структуризації атрибутів-характеристик енергоефективності на основі експертного оцінювання

Результатом запропонованої процедури є формування наборів істотних характеристик енергоефективності для кожної задачі F комплексного моніторингу енергоефективності з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження. Відкритість архітектури ІАС моніторингу забезпечує можливість корегування даного набору відповідно до зміни технічних засобів $\{T\}$ інформаційного забезпечення моніторингу та розширення можливостей щодо отримання (вимірювання та накопичення) додаткових даних.

6.4 Об'єктно-орієнтована формалізація інформаційної технології комплексного моніторингу енергоефективності

Формалізацію процедури комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання ВГ виконано з використанням об'єктно-орієнтованого підходу. Основною складовою об'єктно-орієнтованого аналізу (або дослідження) є декомпозиція проблеми на окремі класи понять (концептуальні класи) або

об'єкти. Застосування об'єктно-орієнтованого методу припускає проведення об'єктного аналізу предметної області та реалізації на його основі - об'єктно-орієнтованого проектування. Суть такого аналізу полягає в ототожненні сутностей (предметів, об'єктів, процесів) предметної області у вигляді сукупності інформаційних об'єктів, що взаємодіють один з одним [344].

Об'єкти середовища моделюються за допомогою класів з об'єднаними властивостями і правилами існування – сукупностей, що мають спільні ознаки та однакові якості. Архітектуру процедури комплексного моніторингу енергоефективності наведено на рис.6.6.

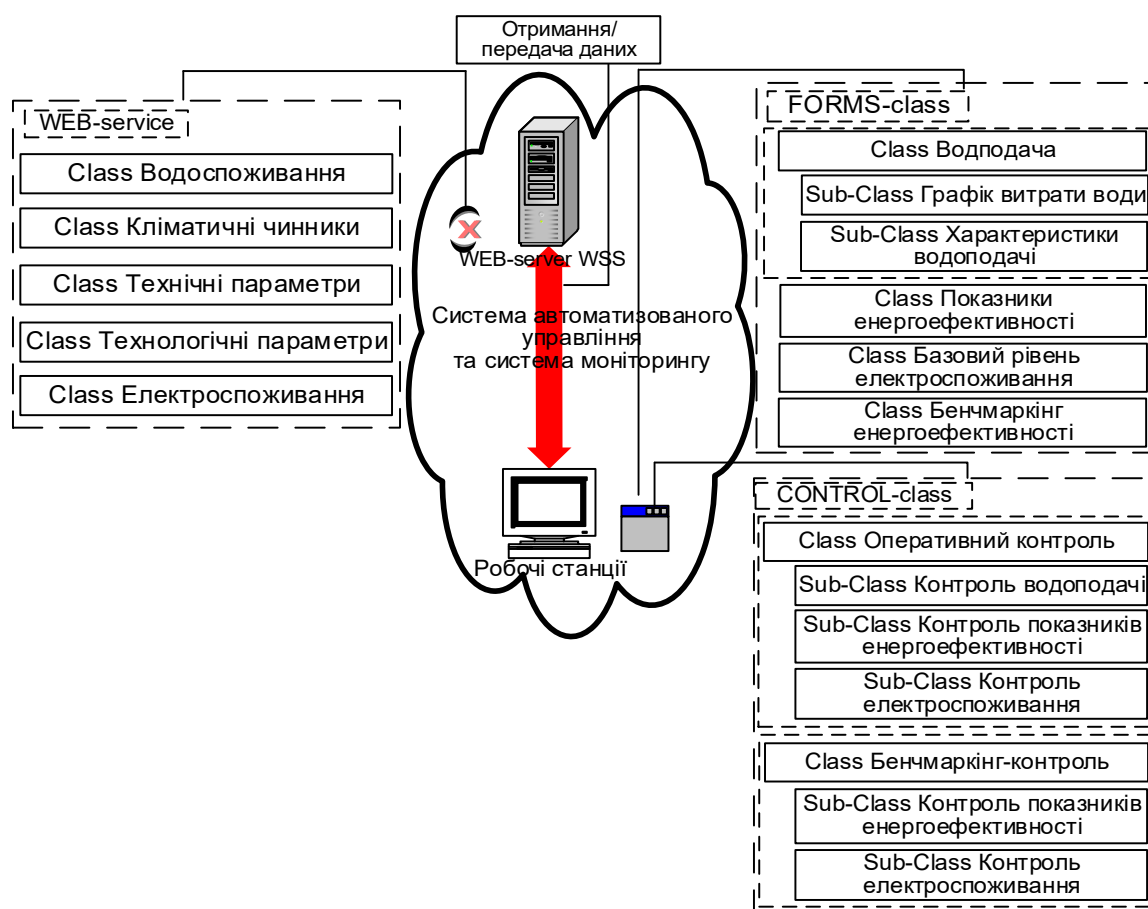


Рисунок 6.6 - Архітектура інформаційної технології комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів ВГ (на мікрорівні)

Виділено три категорії класів [20, 43, 55, 57]:

- 1) WEB-service – сукупність класів, які об'єднані процедурою отримання вихідної інформації про об'єкт дослідження (про водоспоживання, кліматичні чинники, технічні та технологічні параметри, електроспоживання);
- 2) FORMS-class – сукупність класів, які об'єднані обчислювальними алго-

ритмами та моделями. Забезпечують виконання таких процедур:

- class Водоподача – передбачає: Sub-class Графік витрати води: опис та аналіз нерівномірності добових ГВВ, виявлення та ідентифікація циклічних змін ВВ; Sub-class Водоподача: формалізований опис водоподачі для типових умов роботи, корегування характеристик добової водоподачі та її профіля добового ГВВ з урахуванням інформації про кліматичні чинники; планування енергоефективних режимів роботи об'єктів водопостачання;

- class Показники енергоефективності – визначення коефіцієнтів енергоефективності процесу водоподачі (у випадку здійснення подобового аналізу енергоефективності - з урахуванням типового добового ГВВ для характерного дня);

- class Базовий рівень електроспоживання - побудова моделей електроспоживання об'єктів водопостачання; визначення БРЕ для типових умов роботи об'єкту водопостачання;

- class Бенчмаркінг енергоефективності - порівняльний аналіз (внутрішній та зовнішній) та оцінювання рівня енергоефективності об'єктів водопостачання рівня енергоефективності, встановлення завдань для його підвищення;

3) CONTROL-class – сукупність класів, які об'єднані процедурами виконання контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання. Забезпечують виконання таких процедур:

- class Оперативний контроль – Sub-class Контроль електроспоживання: контроль ефективності електроспоживання, виявлення моментів невідповідного зниження (підвищення) ефективності електроспоживання, сигналізація про перевищення БРЕ; Sub-class Контроль водоподачі: контроль технологічних параметрів процесу водоподачі та виявлення причин недотримання БРЕ; Sub-class Контроль показників енергоефективності: контроль показників ефективності процесу водоподачі та динаміки питомого електроспоживання для виявлення тенденцій до підвищення/зниження рівня енергоефективності;

- class Бенчмаркінг-контроль – Sub-class Контроль показників енергоефективності: контроль рівня енергоефективності; аналіз динаміки показників енергоефективності об'єкту та їх порівняння з показниками кращих об'єктів; Sub-class

Контроль електроспоживання: контроль дотримання БРЕ кращих об'єктів.

Кожен клас містить властивості об'єкту (визначає структуру даних об'єкту, правила, за якими діють об'єкти), а також методи (функції), які мають доступ до даних об'єкта, обробляють їх, виконують певні операції та завдання. Властивостями класу є кількісні характеристики об'єкту дослідження, а методами – алгоритми розрахунків, процедури, комунікації, дії тощо, що забезпечують функціонування класу (або його моделі). Детальний опис властивостей та методів класів визначається типом об'єкту дослідження, стосовно якого виконується комплексний моніторинг енергоефективності, та конкретизацією постановки задачі дослідження [57, 61, 66]. Приклад опису властивостей та методів класів для КіП енергоефективності на рівні НС II-го підйому наведено в Додатку Е. Реалізація кожного класу передбачає послідовність кількох розрахункових процедур. Результатом є інформація, яка збирається в БД та базі знань. Частина інформації є вихідною для наступних процедур. Інша частина використовується для прийняття рішення про енергоефективність режиму роботи об'єкту водопостачання [57].

Не залежно від ієрархічної приналежності об'єкту дослідження застосування інформаційної технології моніторингу енергоефективності (рис. 6.7) передбачає послідовне виконання наступних етапів [43, 65, 79]:

1. Збір інформації. Здійснюється як для окремих агрегатів, так і для всієї технологічної системи в цілому. Даний блок передбачає отримання звітів автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП) та інших наявних на підприємстві засобів вимірювань, в тому числі, автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (енергоресурсів) (АСКОЕ) та автоматизованих систем обліку електроенергії (АСОЕ), а також містить результати енергетичних обстежень та енергоаудиту, технічні параметри та технологічні характеристики, нормативно-методичну та технічну документацію, технологічні схеми та інші дані по агрегатах, установках, технологічних процесах тощо.

2. Ідентифікація об'єкта дослідження з урахуванням ієрархічного рівня (агрегат, установка, насосна станція, водозабір, перший підйом, підготування води, другий підйом, тощо). Дозволяє реалізувати декомпозицію задачі енергоефектив-

ності, виконати структурування цілей та спростити процедуру формалізації шляхом типізації математичного опису окремих модулів класу (його властивостей та методів) категорії WEB-service.

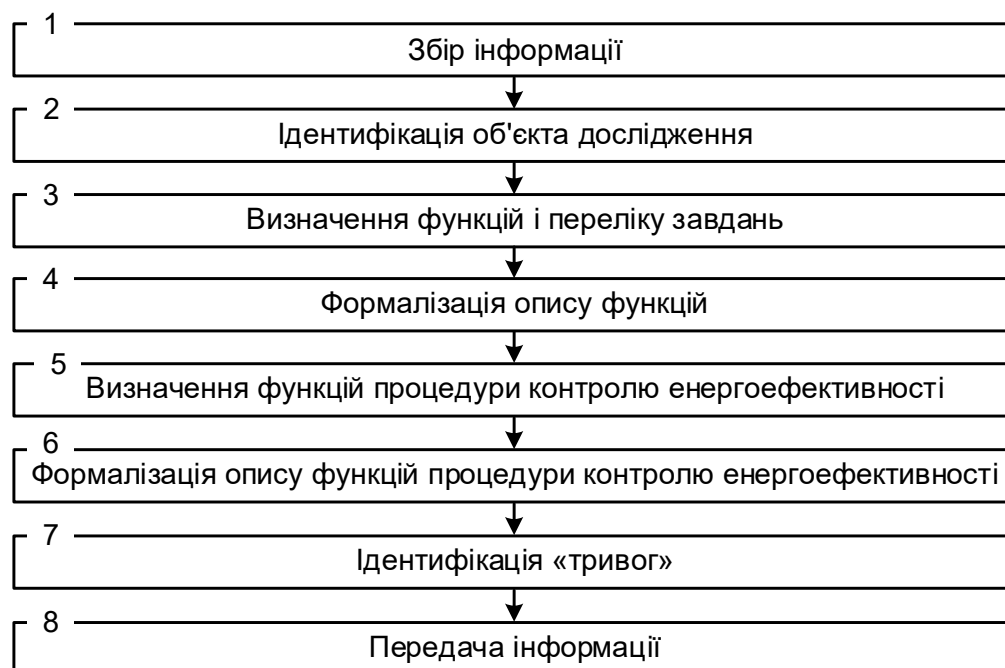


Рисунок 6.7 – Послідовність етапів моніторингу енергоефективності

3. Визначення функцій і переліку завдань. У цьому блоці формуються описи завдань, що потребують вирішення, а також послідовність виконання необхідних розрахунків та звернення до вихідної інформації. Тобто, виконується формалізація властивостей класу категорії FORMS-class. В результаті на основі бази даних 1-го блоку з урахуванням процедур ідентифікації та формалізації, виконаних в блоці 2, формується сукупність необхідних інформативних даних.

4. Формалізація опису функцій. Блок містить математичні моделі і моделюючі алгоритми вирішення завдань з урахування результатів формалізації, виконаних в 3-му блоці. Тобто, виконується формалізація методів класу категорії FORMS-class. В результаті отримуємо очікувані рівні вибраних характеристик енергоефективності (показників енергоефективності, водоподачі, електроспоживання тощо).

5. Визначення функцій процедури контролю енергоефективності. Виконується ідентифікація процедур контролю (оперативний контроль, бенчмаркінг), формалізація властивостей класу категорії CONTROL-class з урахуванням проце-

дур ідентифікації об'єкту дослідження, виконаних в 2-му блоці.

6. Формалізація опису функцій процедури контролю енергоефективності. Блок містить необхідні розрахункові процедури та алгоритми згідно ідентифікації функцій контролю енергоефективності в 5-му блоці, а також послідовність звернення до моделей вибраних характеристик ефективного електроспоживання, отриманих в блоці 4. Тобто, виконується формалізація методів класу категорії CONTROL-class та, власне, сама процедура контролю.

7. Ідентифікація «тривог». Даний блок передбачає фіксування результатів контролю, видачу попереджень про перевищення сформованих нормативів та БРЕ, а також їх документування та формування звітів.

8. Передача інформації. Виконується передача результатів контролю у відповідні підсистеми управління, а також в СЕМ підприємства.

Всі вхідні і вихідні дані предметної області мають бути представлені у вигляді інформаційних блоків [53, 339]:

- блок даних про об'єкти: призначений для опису стану об'єкту; містить інформацію про об'єкти процесу контролю енергоефективності;

- блок даних про параметри об'єктів: призначений для опису показників, що характеризуються наборами кількісних значень;

- блок даних про алгоритми розрахунків: призначений для опису схем розрахунків для формування значень розрахункових параметрів об'єктів - показників енергоефективності при виконанні розрахунків за різними методиками залежно від ієрархічної приналежності об'єкта;

- блок даних про результати розрахунків: призначений для опису варіантів розрахунків для об'єктів і накопичення отриманих даних з метою подальшого їх використання при формуванні звітних документів;

- блок даних про форми звітних документів: призначений для підготовки і формування стандартних вихідних форм документів з результатами розрахунків.

Множина існуючих структурних та функціональних відносин виступає елементом алгоритму інформаційного пошуку, тобто, вказує послідовність вибірки інформації, порядок необхідних розрахунків та контрольних процедур [53].

Для реалізації комплексного моніторингу ефективності електроспоживання в СКВ на центральному сервері підприємства ВГ необхідно інсталивати WEB-service Система водопостачання (WSS), що забезпечить виконання процедур обробки вихідної інформації, необхідної для аналізу ефективності електроспоживання об'єктів СКВ, створення БД, формування звітів про результати контролю енергоефективності тощо.

6.5 Побудова архітектури інформаційного забезпечення комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів підприємства водопровідного господарства

Інформаційна система моніторингу - система спеціально організованого автоматизованого відстеження стану та поведінки об'єкта управління, а також зовнішнього середовища за заздалегідь узгодженими характеристиками (критеріями, показниками, параметрами) з метою визначення відповідності їх фактичних і планових значень [160, 345]. Зазначені показники можуть бути використані в якості вихідних даних в складних моделях аналізу, прогнозування та комплексної оцінки стану об'єкта управління, вирішенні завдань підвищення ефективності його функціонування. Ієрархічність ВГ зумовлює ієрархічність проблеми дослідження, яка направлена на удосконалення цієї системи. Отже, до побудови системи інформаційного забезпечення комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів ВГ може бути застосоване стратифіковане представлення [54]. Це спрощує опис об'єктів та процедур-алгоритмів, проте зберігає їх підпорядкованість єдиній меті. Тобто, всі її підсистеми не залежно від їх функцій об'єднані єдиним інформаційним простором. Результатом їх функціонування має бути формування єдиної бази знань для прийняття рішень щодо підвищення енергоефективності СКВ.

Під час розробки системи комплексного моніторингу енергоефективності ВГ доцільно орієнтуватися на використання телекомунікаційних і Web- технологій, БД, СУБД, сховищ даних, компонентів збирання, оцінювання, оперативного аналітичного та інтелектуального опрацювання інформації, візуалізації результатів її опрацювання для прийняття управлінських рішень щодо підвищення рівня

енергоефективності об'єктів водопостачання ВГ [346].

Завданнями будь-якої інформаційної системи є ефективне зберігання, обробка і аналіз даних. Для вирішення завдань моніторингу енергоефективності першим етапом є отримання інформації та формування баз фактичних даних, що характеризують стан, умови та ефективність функціонування об'єкту моніторингу та відображають сукупність взаємозв'язаних даних, що описують певну предметну область. Від того, як сформовано БД за об'єктами моніторингу, залежить якість результатів оцінювання, планування та контролю ефективності електроживлення. БД в системі моніторингу енергоефективності є інтегрованою сукупністю спеціальним чином організованих (структурованих) даних і зв'язків між ними. Іншими словами, це датологічне подання інформації про предметну область. Щоб полегшити формування БД, варто деталізувати інформацію відповідно до об'єктів ВГ з урахуванням їх ієрархічного рівня. Моніторингова інформація потрібна в опрацьованому вигляді, який є результатом взаємодії комплексу дій (збору, систематизації, обробки даних, формування звітності в зручних форматах). Інформація повинна бути повною та оперативною, а також доступною для енергоменеджерів підприємства та галузі.

Архітектура сучасних інформаційних систем повинна відповідати політиці інноваційного розвитку не залежно від сфери їх використання. Це висуває відповідні вимоги до побудови сховищ даних, програмного забезпечення, функціональності інформаційної системи. До функціональності сучасних інформаційних систем висувають вимоги, які передбачають відкритість структури системи, наявність гнучкого механізму для внесення нових об'єктів та алгоритмів розв'язку прикладних задач та можливості адаптації до змін як в структурі, так і в значеннях параметрів об'єктів предметної області [337]. Інформаційна система повинна бути створена на основі принципів модульності, відкритості, надійності і безпеки як єдина автоматизована система зберігання, пошуку, відображення та аналізу даних [347]. Відповідність цим вимогам може бути досягнена шляхом впровадження взаємодіючих між собою модулів: модулю збору, попередньої обробки та зберігання даних; модулю аналізу даних; модулю прийняття рішень та управлінських

впливів [348]. Це забезпечить створення гнучкої та, в певній мірі, універсальної інформаційної системи моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання та підприємств ВГ.

Архітектура комплексу інформаційного забезпечення процедур комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання як складової загальної інформаційної СЕМ підприємства ВГ зображена на рис.6.8. Структура запропонованої інформаційної системи моніторингу енергоефективності представляє собою сукупність низки складних підсистем.

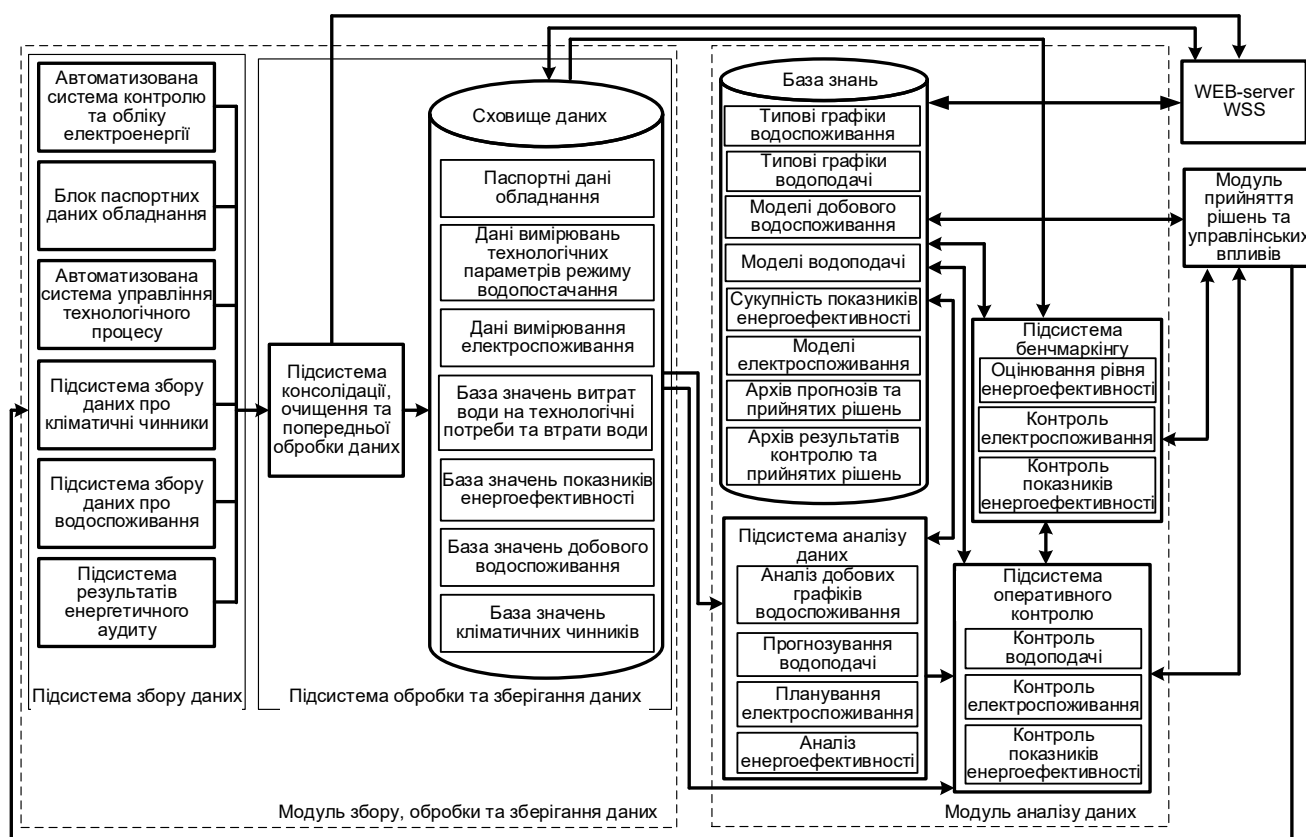


Рисунок 6.8 - Архітектура інформаційного забезпечення процедур моніторингу енергоефективності об'єктів підприємства ВГ

Для забезпечення функціонування запропонованої архітектури, необхідним є налагодження процедур обміну вхідними і вихідними даними. Сучасне підприємство ВГ з точки зору інформаційного забезпечення представляє складну динамічну систему, що характеризується великим обсягом інформації, наявністю інформаційних зв'язків між технологічними процесами та структурними об'єктами системи водопостачання, а також необхідністю регулярного обміну інформацією.

Інформаційне забезпечення процедур моніторингу енергоефективності базується на базах даних діючих АСУ ТП об'єктів водопостачання підприємства, а також систем обліку електроенергії [53]. Ця база даних, доповнена технічними параметрами, що впливають на енергоефективність, кліматичними чинниками тощо дозволить автоматизувати планування параметрів енергоефективності (цільові показники споживання і економії електроенергії) шляхом застосування інтелектуальних методів аналізу та обробки даних.

Модуль збору, попередньої обробки та зберігання даних призначений для прийому потоків інформації з різних джерел та перетворення в формати, зручні для зберігання та наступного опрацювання даних. Підсистема накопичення інформації передбачає об'єднання фізичних пристроїв реєстрації первинних даних. Інформаційними джерелами є контрольно-вимірювальні прилади, системи обліку споживання енергоресурсів, системи управління технологічним процесом. Підсистема повинна забезпечувати виконання збору даних моніторингу від локальних АСУ ТП, АСКОЕ та метеостанцій із кроками накопичення даних: година, доба, тиждень, місяць, їх перевірки та передачі зібраних даних на центральний web-сервер підприємства та їх розміщення у БД. Сховище даних покликане забезпечити єдине логічне представлення даних, що містяться в БД технологічного процесу, енергетичних та кліматичних даних тощо. В сховищі даних нарівні із поточними повинні зберігатися ретроспективні дані з фіксацією моменту часу, якого вони стосуються. Обробка та інтеграція інформаційних потоків повинна бути реалізована за допомогою відповідних інструментів вилучення, перетворення і завантаження даних, а аналіз даних - за допомогою набору математичних моделей. Результати моніторингу є основою бази знань для здійснення управлінських впливів щодо підвищення рівня енергоефективності об'єктів водопостачання.

Наявність автоматизованих систем та застосування технології бездротової передачі даних спрощує збір та обробку інформації по кожному із об'єктів СКВ. Застосування web-технологій забезпечує зв'язок між контрольними пунктами та центральним сервером підприємства. Інформаційний обмін між об'єктами водопостачання підприємства ВГ дозволяє реалізувати принцип однократного введення

ня, багатократного і багатоцільового використання статистичної інформації. Це дозволить здійснити консолідацію даних в єдиній інформаційній базі даних підприємства [41] (рис. 6.9).

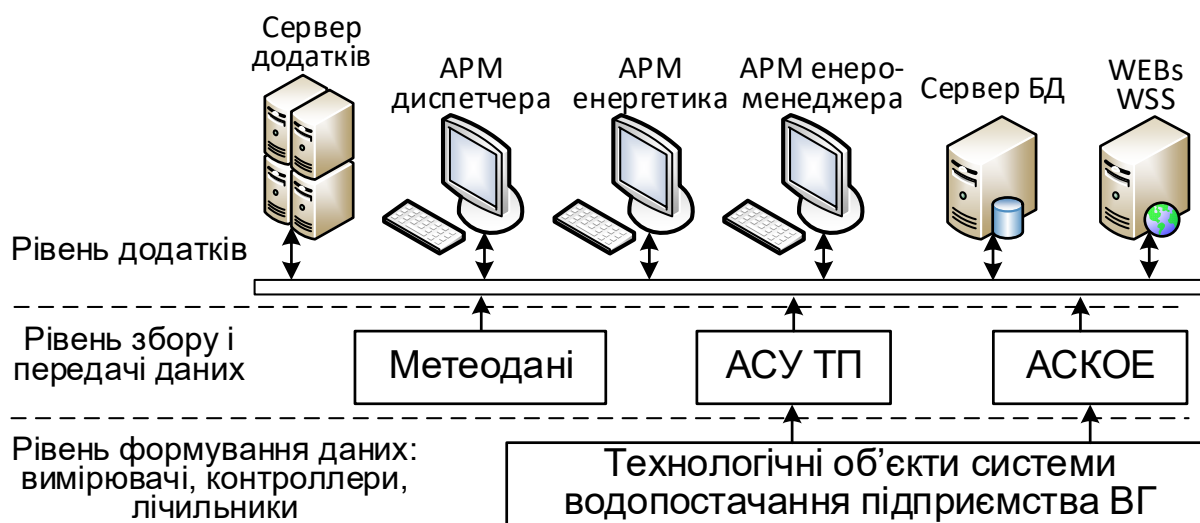


Рисунок 6.9 – Структурна схема організації інформаційного простору моніторингу енергоефективності підприємства ВГ

Web-орієнтовані системи моніторингу є ефективним інструментом енергетичного менеджменту [349]. Система комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання підприємства ВГ, яка забезпечуватиме збір даних в онлайн-режимі, передбачає трирівневу архітектуру побудови web-додатків і наявність трьох компонентів: сервера баз даних, клієнтського додатку та web-сервера, що відповідає за виконання клієнтських додатків [350]. Оскільки система моніторингу енергоефективності є складовою СЕМ, яка в свою чергу є компонентом управління технологічним процесом з точки зору ефективності електроспоживання і інтегрується із SCADA-системами, то під час її розробки доцільним є використання технології автоматизації диспетчерського управління SCADA [159], а також концепції побудови інформаційних систем на основі взаємодіючих між собою програмних агентів [351]. Сучасні системи моніторингу, які призначені для віддаленого збору даних, передбачають використання технології GSM/GPRS [352], а також бездротової технології передачі даних ZigBee [353, 354], що є основою підвищення оперативності надходження даних моніторингу.

Отримання даних про кліматичні умови передбачає отримання інформації

від метеорологічної служби міста. Також можливе отримання інформації про кліматичні умови шляхом застосування даних сайту прогнозу погодних умов [161], яка надається у вільному доступі. В такому випадку необхідною є організація процедури перевірки оновлення інформації у встановлені інтервали часу та розміщення її у базі даних [355].

Реалізація передачі інформаційних потоків між об'єктами водопостачання та центральним сервером підприємства на базі web-орієнтованих систем дозволить створити єдиний інформаційний простір моніторингу енергоефективності підприємства ВГ та забезпечити можливість обробки інформації про параметри режимів та показники енергоефективності структурних елементів та СКВ в цілому, видачі енергоменеджеру інформації, що сприятиме прийняттю дієвих управлінських рішень щодо першочерговості впровадження заходів з енергозбереження та підвищення рівня енергоефективності.

6.6 Практичні результати застосування та інтегрування процедур моніторингу ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання

Запропоновані принципи організації комплексного моніторингу ефективності електроспоживання застосовано до об'єктів водопостачання різних ієрархічних рівнів КП «Луцькводоканал». Вихідною інформацією є спостережені значення електроспоживання та технологічних параметрів процесу водоподачі. З урахуванням запропонованих процедур моніторингу циклічних змін процесу водоподачі встановлено періоди збору ретроспективних даних для встановлення планових значень визначальних змінних БРЕ та планування електроспоживання (визначення БРЕ) об'єкту моніторингу з урахуванням типових умов його роботи. Застосування моделей класифікаторів забезпечило ідентифікацію належності спостереженого добового ГВВ до одного з типових класів, що дало змогу виконати перевірку відповідності фактичного режиму водоподачі запланованому. Застосування процедури контролю кліматичних чинників забезпечило виявлення моментів та необхідності коригування планових значень характеристик водоподачі та БРЕ. Ре-

зультатом послідовного застосування запропонованих процедур моніторингу є реалізація контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання, тенденцій до підвищення/зниження рівня енергоефективності та організація повідомлень енергоменеджера про результати контролю з урахуванням фактичних умов роботи об'єкту водопостачання.

6.6.1 Результати контролю ефективності електроспоживання в системі комунального водопостачання (рівень підприємства)

6.6.1.1 Контроль дотримання БРЕ та виявлення причин неефективного електроспоживання. Визначення БРЕ СКВ виконано з урахуванням типу сезону під час планування визначальних змінних. З цією метою на основі математичної моделі електроспоживання в СКВ та середніх значень визначальних змінних відповідного сезону розраховано середнє значення очікуваного місячного електроспоживання та межі його довірчого інтервалу. На основі співставлення фактичного електроспоживання з плановими (рис. 6.10) було виявлено моменти невідповідності (можливого підвищення) ефективності електроспоживання.

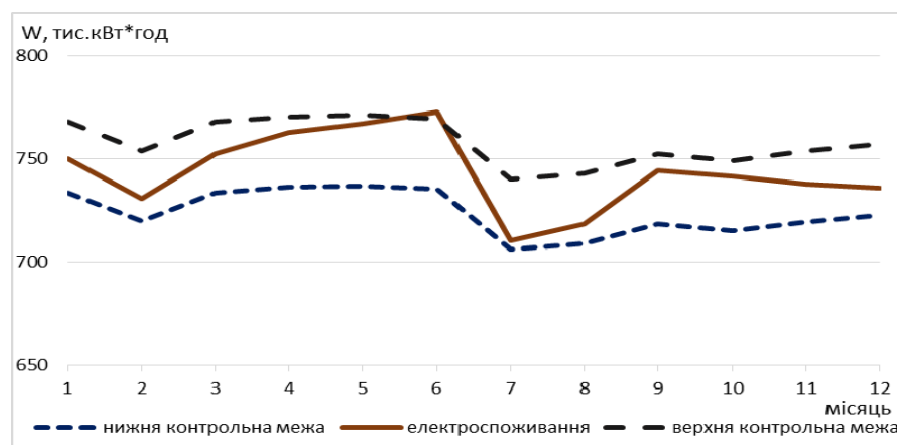


Рисунок 6.10 - Контроль ефективності електроспоживання

Для виявлення причин, що зумовили дану ситуацію, застосовано процедуру контролю визначальних змінних. Для вибору інструменту контролю (типу КК) встановлено ступінь взаємозв'язку між визначальними змінними БРЕ. Результати кореляційного аналізу (табл.6.1) вказують на наявність кореляції між окремими визначальними змінними БРЕ: $Q_{підн}$ - об'єм піднятої води; $Q_{под}$ - об'єм поданої в мережу води; $Q_{втр}$ - втрати води в мережі. Це зумовлює необхідність побудови ка-

рти Хотеллінга (рис. 6.11) для контролю цих змінних. Для контролю ВВ на технологічні потреби застосовано карту індивідуальних значень Шухарта (рис. 6.12).

Таблиця 6.1 – Результати кореляційного аналізу визначальних змінних БРЕ

Визначальні змінні	Коефіцієнти кореляції			
	$Q_{підн}$	$Q_{под}$	$Q_{втр}$	$Q_{техн.втр}$
$Q_{підн}$	1,000	0,998	0,842	0,008
$Q_{под}$	0,998	1,000	0,846	-0,049
$Q_{втр}$	0,842	0,846	1,000	-0,078
$Q_{техн.втр}$	0,008	-0,049	-0,078	1,000

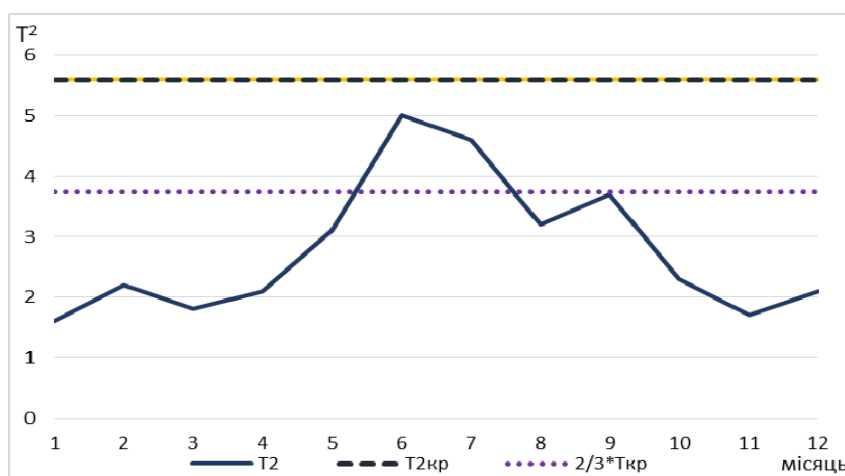


Рисунок 6.11 - Карта Хотеллінга для групи корельованих визначальних змінних БРЕ.

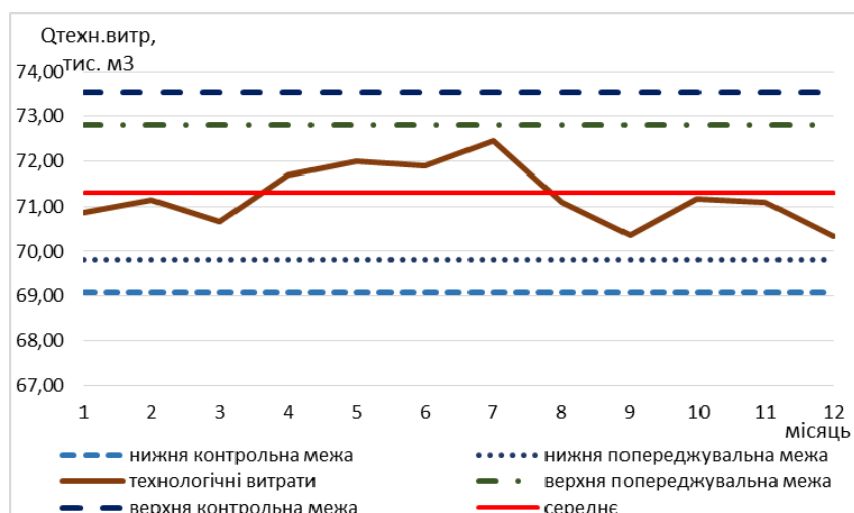


Рисунок 6.12 - Контрольні карти X-карти індивідуальних значень для витрат води на технологічні потреби.

Результати досліджень показали: що ВВ на технологічні потреби не залежать від сезону. Аналіз карт Шухарта свідчить, що ВВ на технологічні потреби

протягом контрольованого періоду знаходяться в допустимих межах. Невідповідність фактичних об'ємів піднятої та поданої води, а також втрат в мережі їх запланованим значенням є ймовірною причиною недотримання БРЕ. Аналіз КК Хотеллінга вказує на факт впливу групи змінних на відхилення в електроспоживанні, але не показує характер відхилення в змінних від запланованих значень, тому визначення часткових критеріїв Хотеллінга та побудова карт Хотеллінга для кожної змінної в даному випадку є недоцільним. Зважаючи на недоліки карт Хотеллінга, застосовано процедуру контролю на основі карт Шухарта. Контроль визначальних змінних здійснювався з урахуванням контрольних меж карт Шухарта, побудованих для кожного чинника залежно від сезону та його тривалості. Результати контролю ефективності електроспоживання в СКВ та аналізу причин неவிпадакової зміни рівня ефективності витрати електроенергії представлено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати контролю ефективності електроспоживання в СКВ

Місяць	Відхилення $W_{\text{факт}}$ від нормативу, %	Вихід визначальних змінних за контрольні/попереджувальні межі				Причина	Повідомлення енергоменеджера
		$Q_{\text{підн}}, \text{м}^3$	$Q_{\text{под}}, \text{м}^3$	$Q_{\text{втр}}, \text{м}^3$	$Q_{\text{техн.втр}}, \text{м}^3$		
Січень	0	0/0	$\frac{0}{-292}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Лютий	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Березень	0	$\frac{0}{-144}$	$\frac{0}{-63}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Квітень	0	$\frac{0}{+1120}$	$\frac{0}{+1186}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Травень	0	$\frac{0}{+3412}$	$\frac{0}{+3386}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Червень	+1,2	$\frac{+941}{+11262}$	$\frac{+100}{+10852}$	$\frac{0}{+886}$	0/0	Зростання $Q_{\text{підн}}$ Зростання $Q_{\text{под}}$	Перевитрата електроенергії
Липень	0	$\frac{0}{-627}$	$\frac{0}{-551}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Серпень	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Вересень	0	$\frac{0}{+912}$	$\frac{0}{+886}$	$\frac{0}{+936}$	0/0		Електроспоживання в межах норми
Жовтень	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Листопад	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Грудень	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми

Як свідчать отримані результати, в червні спостерігалось перевищення нормативу електроспоживання, причиною якого є збільшення значення об'ємів під-

нятої та поданої в мережу води. В інші місяці електроспоживання спостерігалось в межах норми.

6.6.1.2 Виявлення тенденції зміни енергоефективності на основі контролю питомого електроспоживання. Для дослідження тенденції до поліпшення/погіршення рівня ефективності електроспоживання в СКВ виконано контроль питомого електроспоживання. Для перевірки правомірності застосування карт Шухарта для контролю питомого електроспоживання виконано перевірку відповідності вибірки його значень нормальному закону розподілу ймовірностей.

Результати первинної статистичної обробки даних (табл. 6.3) для перевірки відповідності вибірки нормальному закону розподілу ймовірностей (гіпотези H_0 : випадкова величина має розподіл, відмінний від нормального) вказують на не прийняття гіпотези про відхилення закону розподілу вибірки для питомого електроспоживання від нормального. Результати перевірки гіпотези про вид закону розподілу (про відповідність отриманих результатів спостереження нормальному закону розподілу) не дають підстав для її відкидання. Виконання умови $\chi^2 \leq \chi_{кр.\alpha;\nu}^2$, де $\alpha=0,05$ - рівень значимості; $\nu = l - m - 1$ - кількість ступенів свободи, підтверджує відповідність вибірки нормальному закону розподілу.

Таблиця 6.3 – Результати перевірки відповідності вибірки значень питомого електроспоживання СКВ КП «Луцькводоканал» нормальному закону розподілу

Параметр	Статистичні характеристики									Критерій Пірсона	
	\bar{w}	\bar{S}_w	\bar{S}_w^2	Mo_w	Me_w	A_{ns_w}	S_{As_w}	E_{nk_w}	S_{Ek_w}	χ^2	$\chi_{кр.\alpha;\nu}^2$
Значення	0,525	0,04842	0,0023	0,527	0,526	0,065	0,343	0,19	0,675	0,26717	0,9039

Підтвердження підпорядкування вибірки нормальному закону розподілу забезпечує можливість використання карт Шухарта. Контрольні межі карт Шухарта встановлено на основі статистичного аналізу передісторії даних для питомого електроспоживання в СКВ за чотири роки. Аналіз результатів контролю (рис 6.13) дозволяє стверджувати про статистично керований стан процесу електроспоживання системи водопостачання.

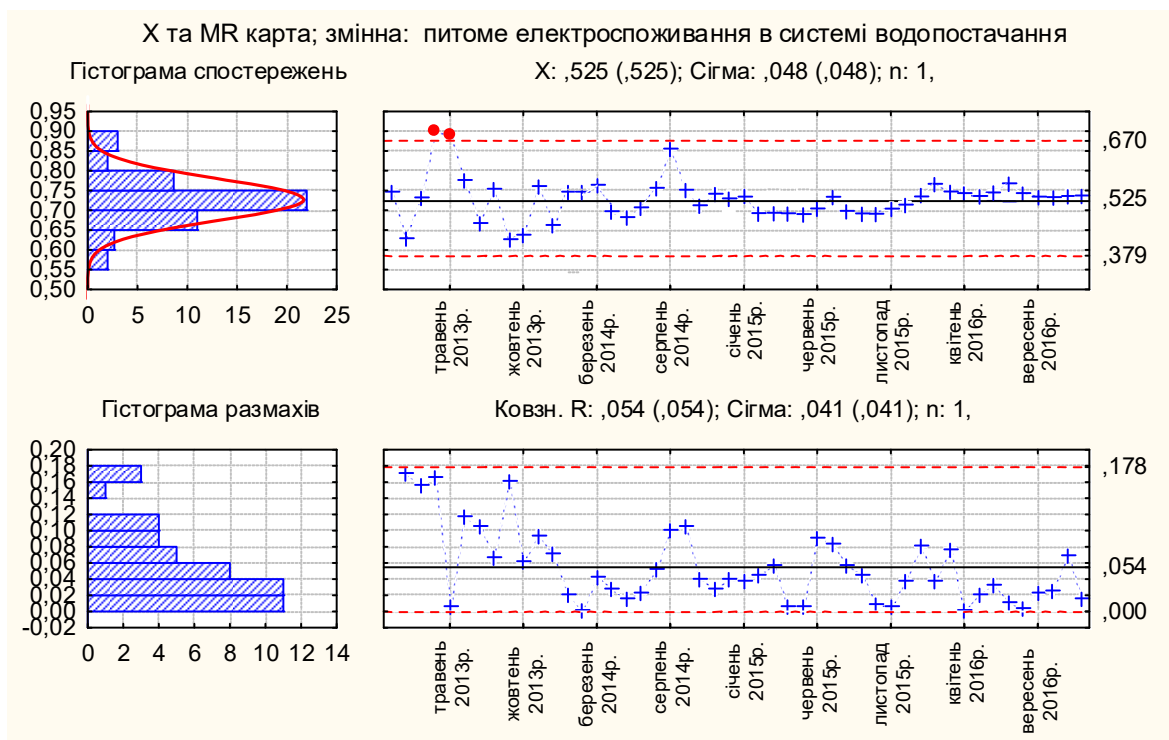


Рисунок 6.13 - Контрольні карти питомого електроспоживання для СКВ

Характеристику ефективності електроспоживання в СКВ виконано спираючись на отримані контрольні карти з урахуванням запропонованої якісної інтерпретації побудованих діапазонів та зон енергоефективності (рис 6.14).

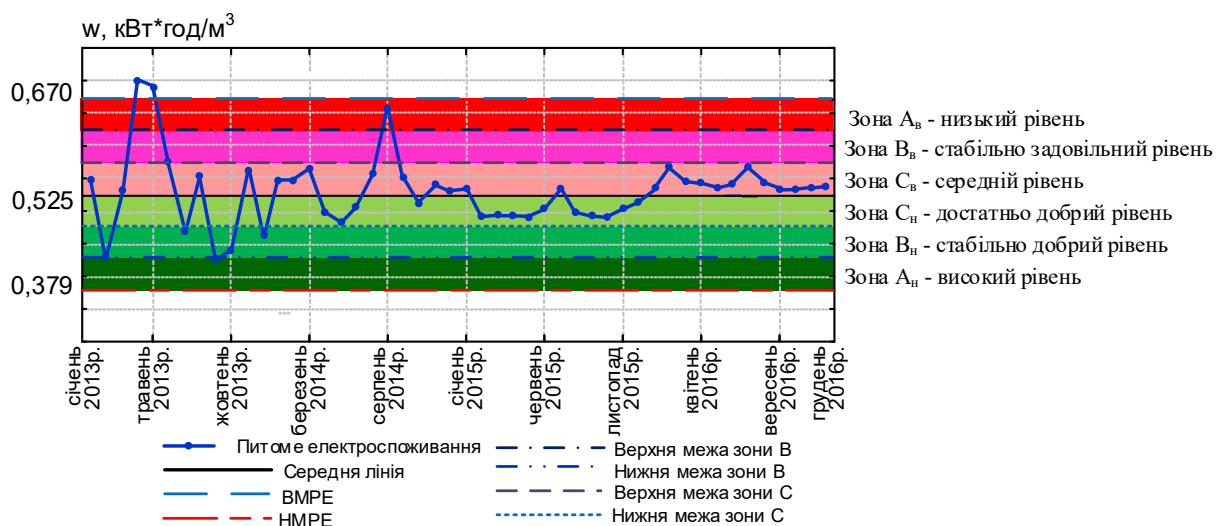


Рисунок 6.14 - Графік питомого електроспоживання в системі водопостачання із зонами енергоефективності

Аналіз отриманих результатів свідчить, що незважаючи на дотримання БРЕ практично протягом усіх місяців контрольного періоду, протягом 2016 р. проглядається тенденція до зниження рівня енергоефективності порівняно із 2015 р.

Контроль питомого електроспоживання в СКВ також засвідчив зростання його значення у червні місяці у порівнянні із травнем, що підтверджує виявлений факт перевитрати електроенергії.

6.6.2 Результати контролю ефективності електроспоживання водозабору

6.6.2.1 Контроль дотримання БРЕ та виявлення причин неефективного електроспоживання. Визначення БРЕ (середнього значення очікуваного місячного електроспоживання та межі його довірчого інтервалу) для водозабору «Дубнівський» виконано на основі математичної моделі електроспоживання даного водозабору та середніх значень визначальних змінних з урахуванням типу сезону та його тривалості впродовж кожного місяця. На основі співставлення фактичного електроспоживання з плановими (рис. 6.15) виявлено моменти невідповідного зниження (можливого підвищення) ефективності електроспоживання.

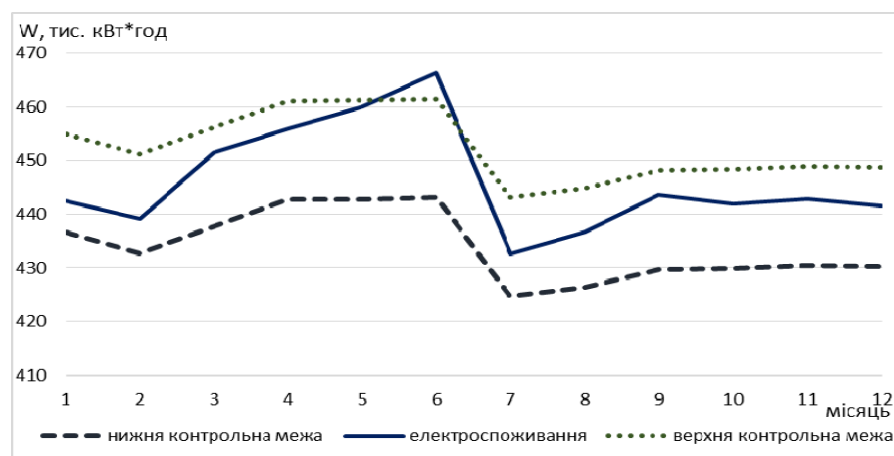


Рисунок 6.15 - Контроль ефективності електроспоживання

Для виявлення причин, що зумовили дану ситуацію, виконано процедуру контролю визначальних змінних. Враховуючи результати дослідження причин недотримання БРЕ в СКВ, контроль визначальних змінних здійснювався з використанням карт Шухарта з урахуванням контрольних меж, побудованих для кожного чинника залежно від сезону. Результати контролю ефективності електроспоживання та аналізу причин невідповідної зміни рівня ефективності витрати електроенергії представлено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Результати контролю ефективності електроспоживання водозабору «Дубнівський»

Місяць	Відхилення $W_{\text{факт}}$ від нормативу, %	Вихід визначальних змінних за контрольні/попереджувальні межі				Причина	Повідомлення енергоменеджера
		$Q_{\text{підн}}, \text{м}^3$	$Q_{\text{под}}, \text{м}^3$	$Q_{\text{втр}}, \text{м}^3$	$Q_{\text{техн. втр}}, \text{м}^3$		
Січень	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Лютий	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Березень	0	$\frac{0}{+304}$	$\frac{0}{+248}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Квітень	0	$\frac{0}{+625}$	$\frac{0}{+586}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Травень	0	$\frac{0}{+2212}$	$\frac{0}{+1086}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Червень	+1,9	$\frac{+1020}{+6213}$	$\frac{+729}{+5925}$	$\frac{0}{+186}$	0/0	Зростання $Q_{\text{підн}}$ Зростання $Q_{\text{под}}$	Перевитрата електроенергії
Липень	0	$\frac{0}{-327}$	$\frac{0}{-281}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Серпень	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Вересень	0	$\frac{0}{+612}$	$\frac{0}{+586}$	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Жовтень	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Листопад	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
Грудень	0	0/0	0/0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми

6.6.2.2 Виявлення тенденції зміни енергоефективності на основі контролю питомого електроспоживання. Для дослідження тенденції до поліпшення/погіршення рівня ефективності електроспоживання водозабору «Дубнівський» виконано контроль питомого електроспоживання [32]. Попередньо виконано перевірку підпорядкування вибірки нормальному закону розподілу (табл. 6.5), результати якої підтвердили можливість використання карт Шухарта [34].

Таблиця 6.5 – Результати перевірки відповідності вибірки значень питомого електроспоживання водозабору «Дубнівський» нормальному закону розподілу

Параметр	Статистичні характеристики									Критерій Пірсона	
	\bar{w}	\bar{S}_w	\bar{S}_w^2	Mo_w	Me_w	A_{ns_w}	S_{As_w}	E_{nk_w}	S_{Ek_w}	χ^2	$\chi^2_{кр. \alpha; \nu}$
Значення	0,502	0,052	0,0027	0,5	0,495	0,15	0,353	0,28	0,685	0,223	0,639

Контрольні межі встановлено на основі статистичного аналізу передісторії даних для питомого електроспоживання водозабору «Дубнівський» за чотири роки. Аналіз результатів контролю (рис 6.16) дозволяє стверджувати про статистично керований стан процесу електроспоживання водозабору «Дубнівський».

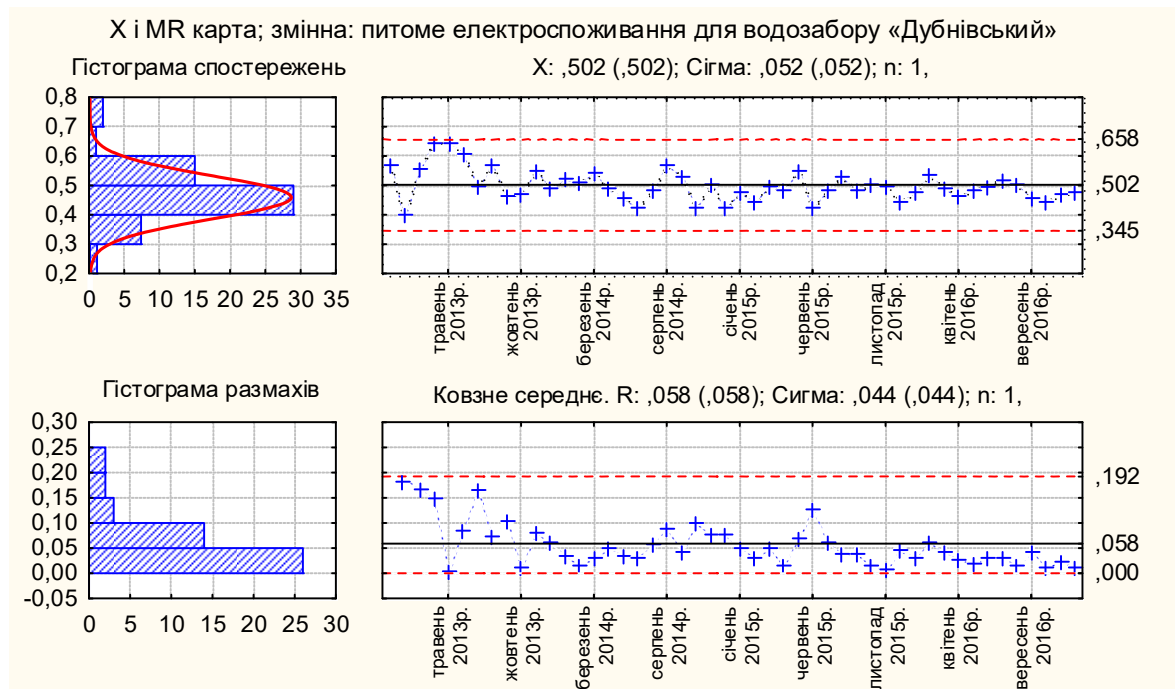


Рисунок 6.16- Контрольні карти питомого електроспоживання для водозабору «Дубнівський»

Характеристику ефективності електроспоживання водозабору «Дубнівський» виконано спираючись на КК з урахуванням запропонованої якісної інтерпретації побудованих діапазонів та зон енергоефективності (рис 6.17).

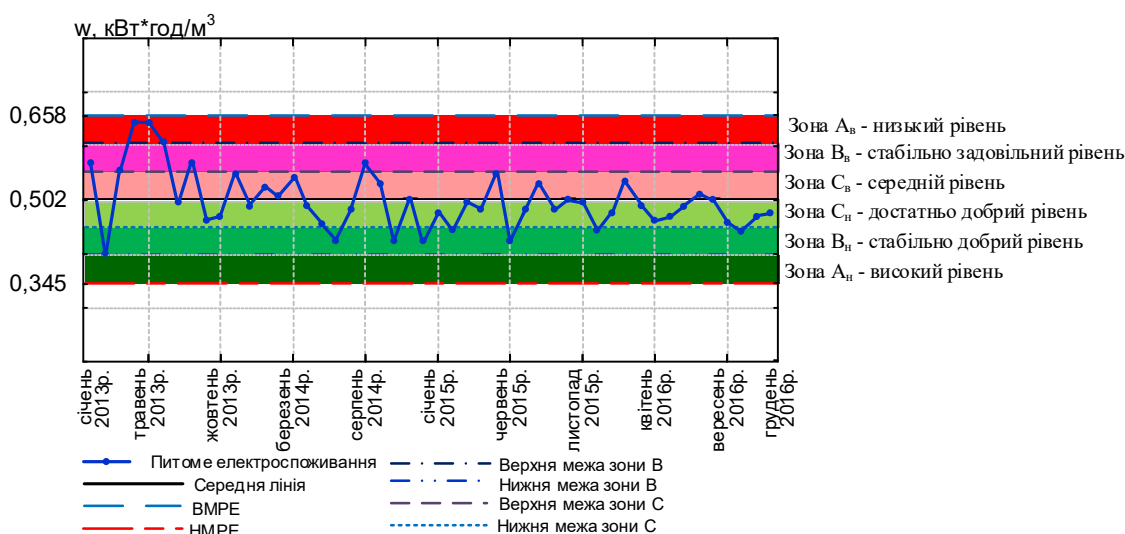
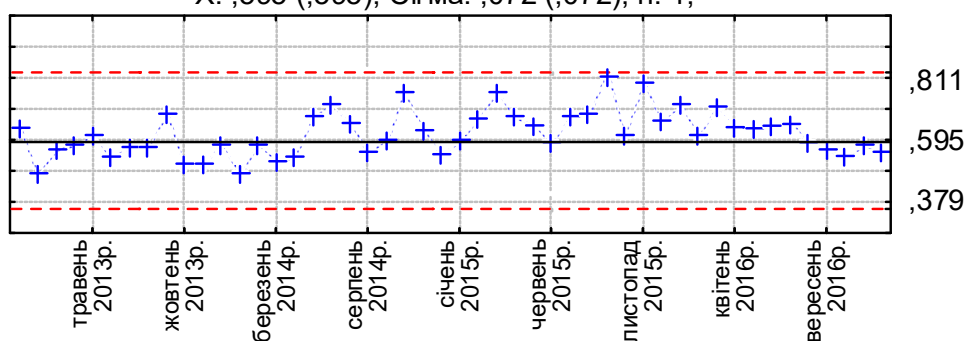


Рисунок 6.17 - Графік питомого електроспоживання водозабору «Дубнівський» із зонами енергоефективності

Аналіз отриманих результатів свідчить про тенденцію до підвищення рівня енергоефективності протягом 2016 року. Разом з тим контроль питомого електроспоживання водозабору засвідчив зростання його значення у червні місяці у порівнянні із травнем, що підтверджує виявлений факт перевитрати електроенергії.

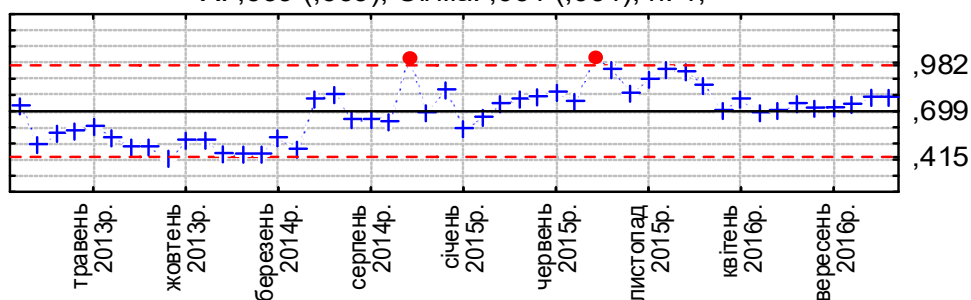
6.6.2.3 Контроль питомого електроспоживання з урахуванням результатів бенчмаркінгу енергоефективності водозаборів. Результати контролю рівня ефективності електроспоживання, виконаного для водозаборів «Омеляниківський» та «Гнідава» КП «Луцькводоканал» (рис. 6.18 – 6.19), свідчать про керований стан процесу електроспоживання на цих водозаборах, в цілому середній рівень ефективності електроспоживання водозабору «Омеляниківський» та істотне зниження рівня ефективності електроспоживання водозабору «Гнідава» з кінця 2014 року, а також вказують на тенденцію до підвищення рівня ефективності електроспоживання для водозабору «Омеляниківський» та зниження рівня ефективності електроспоживання для водозабору «Гнідава» протягом другої половини 2016 року.

Змінна: питоме електроспоживання для водозабору «Омеляниківський»
X: ,595 (,595); Сігма: ,072 (,072); n: 1,



а)

змінна: питоме електроспоживання для водозабору «Гнідава»
X: ,699 (,699); Сігма: ,094 (,094); n: 1,



б)

Рисунок 6.18 - X-карти індивідуальних значень: а) водозабору «Омеляниківський»; б) водозабору «Гнідава»

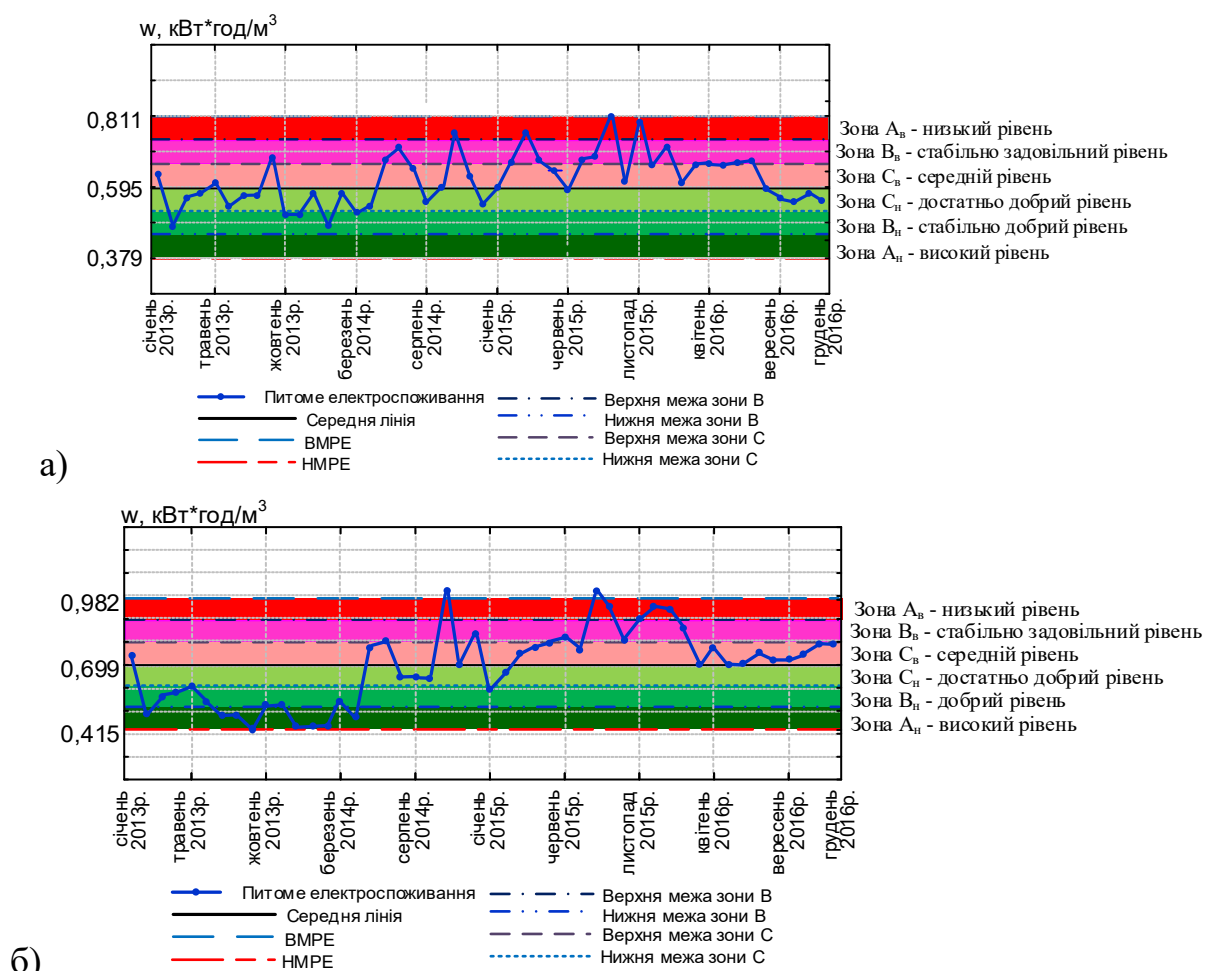


Рисунок 6.19 - Графік питомого електроспоживання із зонами енергоефективності: а) водозабору «Омеляниківський»; б) водозабору «Гнідава»

Виходячи з вимоги постійного удосконалення рівня ефективності електроспоживання, його контроль повинен передбачати врахування досягнень кращих за рівнем енергоефективності об'єктів. Використання бенчмаркінгу дає можливість оцінити ефективність електроспоживання у порівнянні з кращим об'єктом та оцінити наскільки критичним є стан речей на об'єкті контролю.

Згідно результатів внутрішнього бенчмаркінгу енергоефективності водозаборів КП «Луцькводоканал» кращим є водозабір «Дубнівський». Отже, його контрольні межі та зони енергоефективності (рис. 6.17) доцільно прийняти за еталон ефективного електроспоживання та на основі їх інтерпретації провести порівняльну характеристику рівня ефективності електроспоживання інших об'єктів. З цією метою виконано накладання отриманих еталонних зон енергоефективності на графіки питомого електроспоживання водозабору «Омеляниківський» та водозабору «Гнідава» (рис. 6.20).

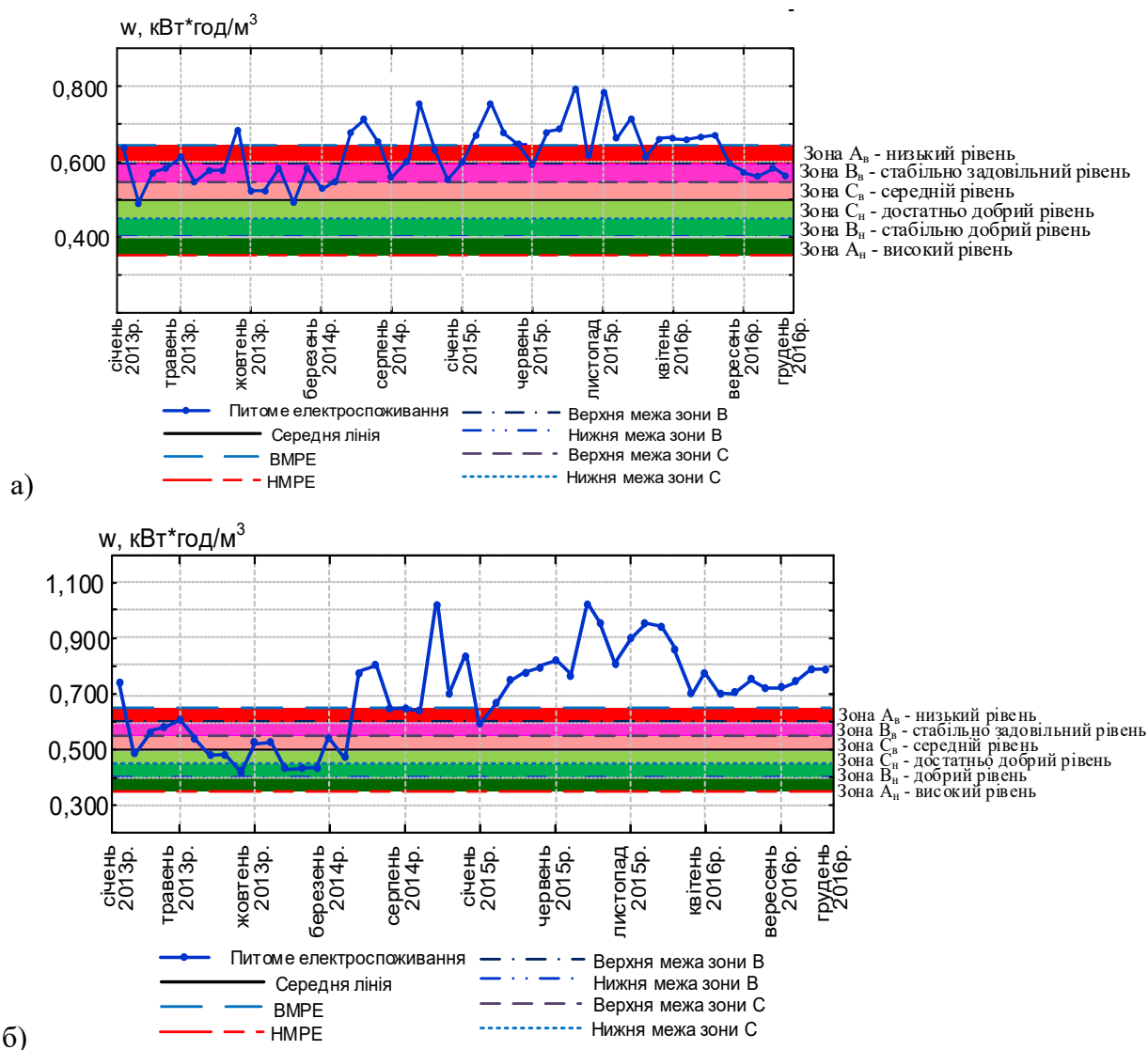


Рисунок 6.20 - Графік питомого електроспоживання з еталонними зонами енергоефективності водозабору «Дубнівський»: а) водозабору «Омеляниківський»; б) водозабору «Гнідава»

Результати аналізу дозволяють стверджувати, що незважаючи на керований стан ефективності електроспоживання на водозабір «Омеляниківський», його рівень ефективності електроспоживання у порівнянні з водозабором «Дубнівський» протягом контрольованого періоду є значно нижчим середнього рівня та часто є незадовільним. За умови збереження тенденції до підвищення рівня ефективності електроспоживання, яка проглядається з другої половини 2016 року, можливе досягнення об'єктом вищого рівня енергоефективності. Для водозабору «Гнідава» протягом 2013-перша половина 2014 року у порівнянні з водозабором «Дубнівський» характерним був достатньо добрий рівень ефективності електроспоживання.

Проте його погіршення з кінця 2014 року призвело до незадовільного стану ефективності електроспоживання, причому тенденція до поліпшення ситуації не спостерігається. Це свідчить про необхідність впровадження заходів та здійснення управляючих дій, спрямованих на удосконалення процесу водопостачання та підвищення рівня ефективності електроспоживання.

Оскільки водозабір «Гнідава» має найнижчий рейтинг, то більш досяжним еталоном енергоефективності виступають зони енергоефективності водозабору «Омеляниківський» (рис. 6.21).

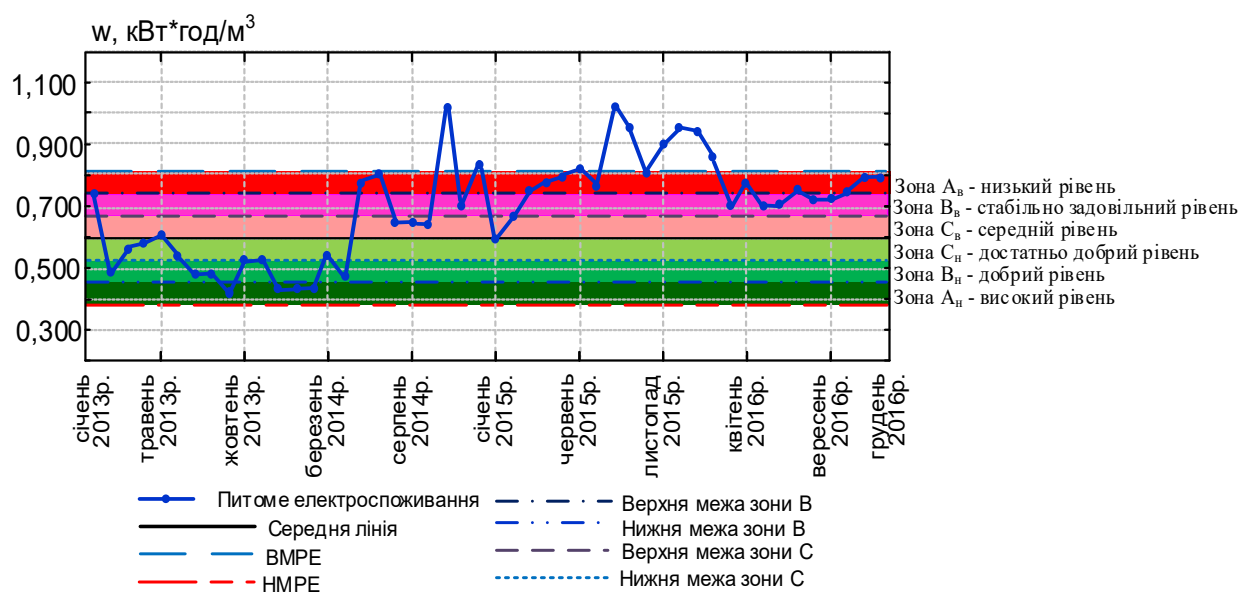


Рисунок 6.21 - Графік питомого електроспоживання водозабору «Гнідава» з еталоновими зонами енергоефективності водозабору «Омеляниківський»

Аналіз отриманих результатів свідчить, що стан ефективності електроспоживання є не таким критичним як у порівнянні з зонами енергоефективності абсолютного лідера. Використання як еталонових зон енергоефективності об'єкту з вищим рейтингом (а не абсолютного лідера) полегшує завдання щодо підвищення рівня енергоефективності об'єкту контролю.

Аналіз результатів контролю є основою для встановлення завдання щодо підвищення рівня ефективності електроспоживання для кожного водозабору та виконання налаштування інструментів сигналізації з урахуванням вибраного об'єкту наслідування (табл. 6.6).

Таблиця 6.6 - Налаштування інструменту сигналізації для контролю рівня ефективності електроспоживання водозаборів

Водозабір	Етап	Тип ІС	Контрольна межа	Значення контрольної межі	Повідомлення енергоменеджера
«Дубнівський»	І етап	«Hi»	Середня лінія	$\bar{w}=0,502$	Зниження рівня енергоефективності
		«Lo»	Нижня межа зони С	$\bar{w} - \sigma_w = 0,452$	Підвищення рівня енергоефективності
	ІІ етап	«Hi»	Нижня межа зони С	$\bar{w} - \sigma_w = 0,452$	Зниження рівня енергоефективності
		«Lo»	Нижня межа зони В	$\bar{w} - 2\sigma_w = 0,401$	Підвищення рівня енергоефективності
«Омеляниківський»	І етап	«Hi»	Верхня межа зони В	$\bar{w} + 2\sigma_w = 0,606$	Зниження рівня енергоефективності
		«Lo»	Верхня межа зони С	$\bar{w} + \sigma_w = 0,552$	Підвищення рівня енергоефективності
	ІІ етап	«Hi»	Верхня межа зони С	$\bar{w} + \sigma_w = 0,552$	Зниження рівня енергоефективності
		«Lo»	Середня лінія	$\bar{w} = 0,502$	Підвищення рівня енергоефективності
«Гнідава»	І етап	«Hi»	Верхня межа зони А	$\bar{w} + 3\sigma_w = 0,811$	Зниження рівня енергоефективності
		«Lo»	Верхня межа зони В	$\bar{w} + 2\sigma_w = 0,739$	Підвищення рівня енергоефективності
	ІІ етап	«Hi»	Верхня межа зони В	$\bar{w} + 2\sigma_w = 0,739$	Зниження рівня енергоефективності
		«Lo»	Верхня межа зони С	$\bar{w} + \sigma_w = 0,667$	Підвищення рівня енергоефективності

Наявність систематичних повідомлень про підвищення рівня ефективності електроспоживання впродовж визначеного енергоменеджером проміжку часу (наприклад, півроку) свідчатиме про появу стійкої тенденції підвищення рівня енергоефективності та можливість переходу до наступного етапу налаштування ІС про перевищення допустимих меж, тобто, встановлення нового завдання. Відсутність повідомлень про підвищення (зниження) рівня ефективності електроспоживання свідчатиме про стабільний рівень енергоефективності об'єкту контролю та відсутність тенденцій як до його погіршення, так і покращення.

6.6.3 Результати контролю ефективності електроспоживання насосної станції II-го підйому

6.6.3.1 Контроль дотримання БРЕ та виявлення причин неефективного електроспоживання. За результатами контролю місячного електроспоживання водозабору «Дубнівський» виявлено перевищення БРЕ протягом червня місяця, серед причин якого є зростання об'ємів води, поданої в мережу водопостачання. З метою уточнення причин такого стану наведено результати подового контролю ефективності електроспоживання НС II підйому водозабору «Дубнівський» за червень місяць та здійснено їх аналіз.

Для підтвердження відповідності фактично отриманого добового ГВВ заданому сезону та характеру дня виконано процедуру ідентифікації його належності до відповідних класів за сезоном та типом дня. Виявлено: добовий ГВВ для 09.06 не відповідав за характеристикою водоподачі сезону «весна-літо-осінь»; добовий ГВВ для 10.06 виявився нерегулярним за типом дня. Оцінка ефективності електроспоживання для цих днів не проводилась через некоректність визначення БРЕ.

Планові значення електроспоживання встановлено як довірчий інтервал до очікуваного електроспоживання, визначеного на основі математичної моделі електроспоживання для відповідного сезону та типу дня та значень визначальних змінних:

- теоретично досяжний БРЕ – з урахуванням усереднених характеристик визначальних змінних для відповідного сезону та типу дня;
- фактично досяжний БРЕ – з урахуванням фактичних значень визначальних змінних (за умови їх відповідності плановим межам зміни).

В результаті порівняння фактичних та планових значень електроспоживання (рис. 6.22) виявлено моменти невідповідного зниження/підвищення ефективності електроспоживання. Для виявлення причин такого стану виконано процедуру контролю технологічних параметрів процесу водопостачання. Як інструмент контролю використано карти Шухарта (рис. 6.23). Як контрольні межі прийнято межі довірчих інтервалів до усереднених значень технологічних параметрів для робочих днів сезону «весна-літо-осінь».

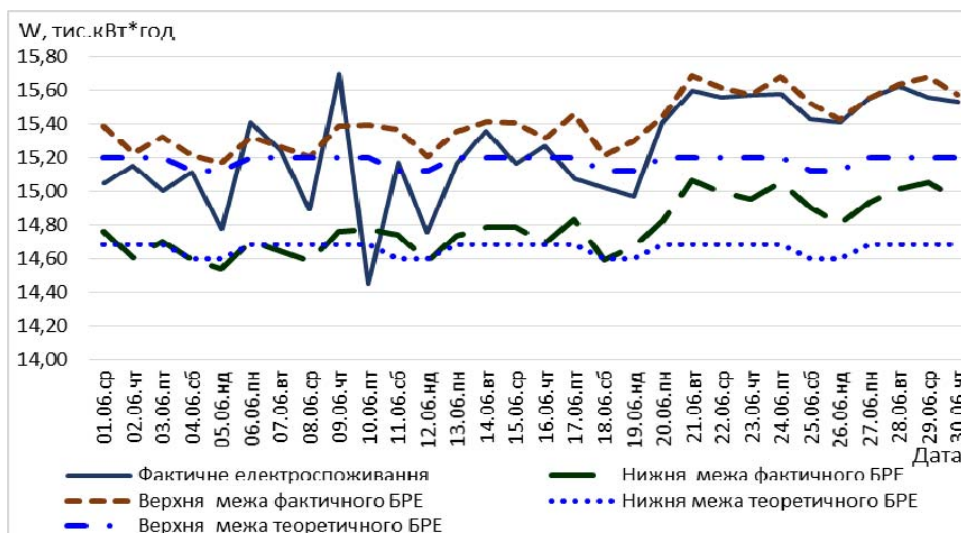


Рисунок 6.22 - Контроль ефективності електроспоживання НС на основі до-
тримання БРЕ

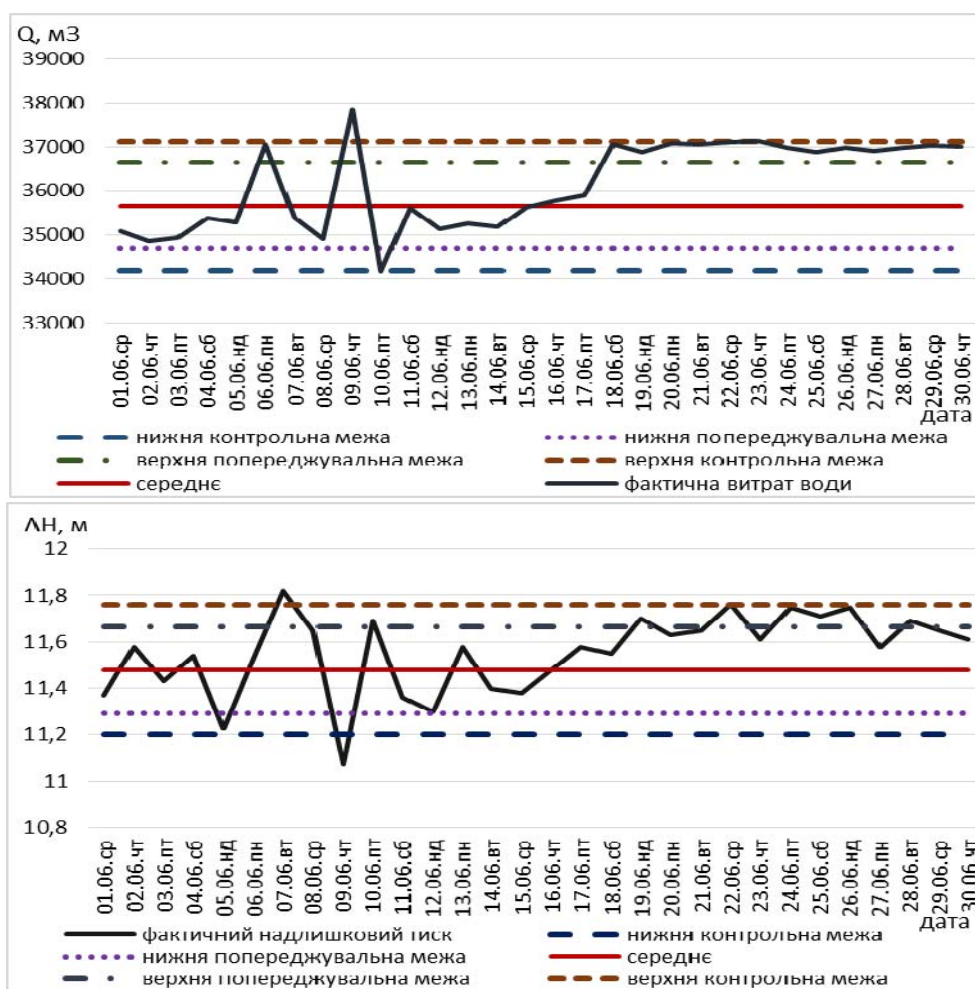


Рисунок 6.23 - Контрольні X-карти індивідуальних значень технологічних
параметрів процесу водоподачі

Результати контролю ефективності електроспоживання НС II підйому, ана-
лізу причин зміни рівня ефективності електроспоживання представлено в табл.6.7.

Таблиця 6.7 – Результати контролю ефективності електроспоживання НС

Дата	Відхилення $W_{\text{факт}}$ від нормативу, %		Вихід визначальних змінних за контрольні/попереджувальні межі		Причина	Повідомлення енергоменеджера
	Теоретичного БРЕ	Фактичного БРЕ	Q , м ³	ΔH , м		
01.06.ср	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
02.06.чт	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
03.06.пт	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
04.06.сб	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
05.06.нд	0	0	0/0	0/-0,06		Електроспоживання в межах норми
06.06.пн	+1,36	+0,55	0/+423	0/+0,1	Зростання Q Зростання ΔH	Перевитрата електроенергії
07.06.вт	+0,27	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
08.06.ср	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
09.06.чт	-	-	$\frac{+745}{+1232}$	$\frac{-0,13}{-0,22}$	Зростання Q	Невідповідність ГВВ режиму водоподачі
10.06.пт	-	-	$\frac{-15}{-503}$	$\frac{0}{+0,02}$		Невідповідність ГВВ режиму водоподачі
11.06.сб	+0,34	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
12.06.нд	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
13.06.пн	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
14.06.вт	+1,02	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
15.06.ср	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
16.06.чт	+0,45	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
17.06.пт	0	0	0/0	0/0		Електроспоживання в межах норми
18.06.сб	0	0	0/+414	0/0		Електроспоживання в межах норми
19.06.нд	0	0	0/+247	0/+0,03		Електроспоживання в межах норми
20.06.пн	+1,36	0	0/+440	0/0		Електроспоживання в межах норми
21.06.вт	+2,52	0	0/+417	0/0		Електроспоживання в межах норми
22.06.ср	+2,30	0	0/+469	0/+0,09		Електроспоживання в межах норми
23.06.чт	+2,36	0	0/+479	0/0		Електроспоживання в межах норми
24.06.пт	+2,41	0	0/+331	0/+0,08		Електроспоживання в межах норми
25.06.сб	+1,99	0	0/+236	0/+0,04		Електроспоживання в межах норми
26.06.нд	+1,87	0	0/+348	0/+0,08		Електроспоживання в межах норми
27.06.пн	+2,25	0	0/+271	0/0		Електроспоживання в межах норми
28.06.вт	+2,69	0	0/+353	0/+0,02		Електроспоживання в межах норми
29.06.ср	+2,30	0	0/+392	0/0		Електроспоживання в межах норми
30.06.чт	+2,14	0	0/+376	0/0		Електроспоживання в межах норми

Примітка: знак «+» - вище контрольного значення; знак «-» - нижче контрольного значення.

Як свідчать отримані результати, 06.06 мало місце перевищення нормативу електроспоживання, причиною якого є збільшення об'єму ВВ та значення надлишкового тиску в диктуючих точках мережі (значення перевищують верхню попереджувальну межу). Отже, можна стверджувати, що причиною перевитрати

електроенергії є неефективний режим водоподачі. Крім того, з 20.06 спостерігається стійке перевищення теоретично досяжного БРЕ на фоні виходу значень ВВ та сумарного надлишкового тиску за верхню попереджувальну межу.

6.6.3.2 Урахування результатів контролю кліматичних чинників. Для отримання остаточного висновку щодо причин невідповідності фактичного та запланованого електроспоживання виконано процедуру контролю середньодобової температури на основі карт Шухарта (рис. 6.24). Контрольні межі визначено на основі статистичної обробки даних щодо температури повітря у червні місяці протягом трьох років (вибірki даних отримано з архіву погоди у м. Луцьку [332]).

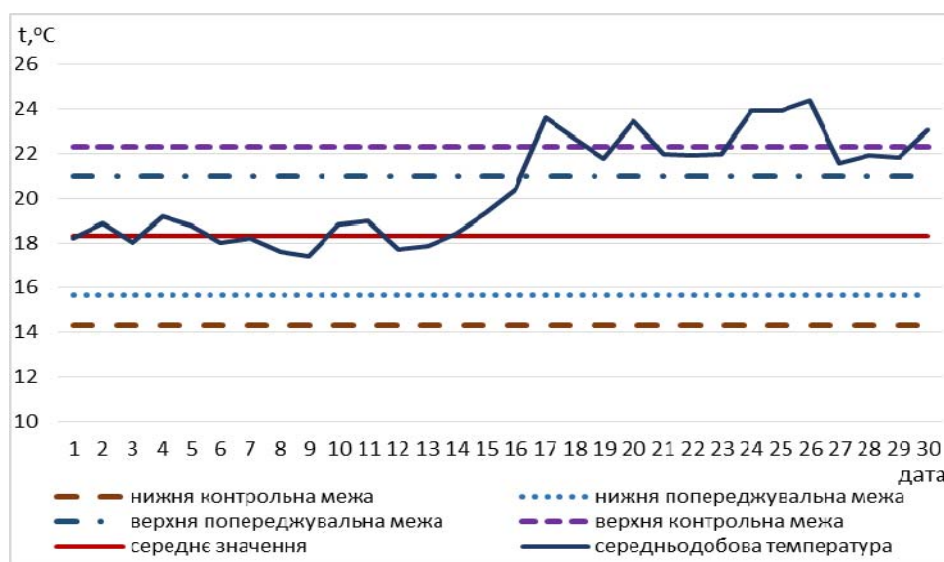


Рисунок 6.24 - X-карти індивідуальних значень для середньодобової температури

Аналіз КК вказує на невідповідність середньодобових температур контрольним межам та стійку тенденцію до аномального підвищення температури в другій половині місяця та необхідність коригування характеристик водоподачі.

На основі спільного аналізу КК для середньодобової температури та технологічних параметрів можна припустити, що зважаючи на аномальне зростання температури було здійснено коригування режиму водоподачі, ознакою чого є вихід значень технологічних параметрів за верхню попереджувальну межу.

Для перевірки ефективності такого коригування на основі математичних моделей, отриманих в п.4.5, визначено прогностні значення добової водоподачі та прогностний профіль добового ГВВ з урахуванням кліматичних чинників. Отри-

мані результати використано для коригування планових добових значень визначальних змінних, з урахуванням яких виконано коригування БРЕ і побудовано КК для електроспоживання з урахуванням відкоригованих довірчих інтервалів БРЕ (рис. 6.25).

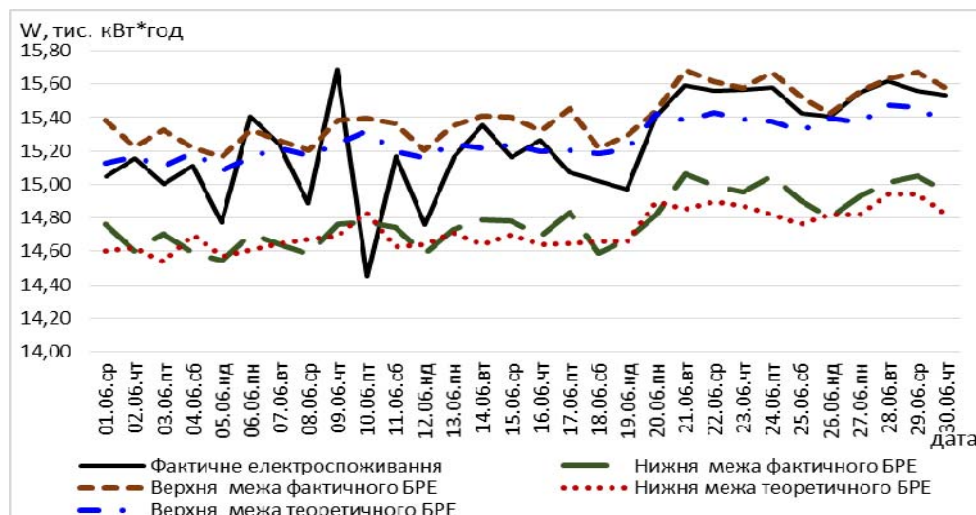


Рисунок 6.25 - Контроль ефективності електроспоживання НС з урахуванням відкоригованого БРЕ

Аналіз відкоригованих КК підтверджують доцільність коригування режиму водоподачі з урахуванням впливу кліматичних чинників. Проте, стійка тенденція перевищення відкоригованого значення теоретично досяжного БРЕ вказує на не-ефективність коригування режиму водоподачі, яке, вочевидь, здійснювалось інтуїтивно, без урахування прогностичних значень характеристик водоподачі.

6.7 Аспекти побудови багаторівневого інформаційного простору комплексного моніторингу енергоефективності водопровідного господарства

Підвищення енергоефективності ВГ є комплексною проблемою, вирішення якої потребує прийняття системних управлінських рішень та передбачає впровадження системи комплексного моніторингу енергоефективності як на рівні окремих підприємств, так і на регіональному рівні та рівні галузі.

Потреба в автоматизації процесів управління енергоефективністю, а також значна кількість інформації (технологічна, енергетична, експертна, інформація

про виробничі одиниці тощо), яку необхідно враховувати для забезпечення ефективного управління, зумовлює необхідність створення спеціалізованої інформаційно-аналітичної системи [347] комплексного моніторингу енергоефективності ВГ, яка повинна враховувати особливості цілей моніторингу енергоефективності на мікро- та макрорівнях. Для ефективного вирішення задач моніторингу енергоефективності ВГ доцільно забезпечити інтеграцію інформаційних ресурсів підприємств в єдиний інформаційний простір та створити на його основі інформаційно-аналітичні системи регіонального та галузевого рівня. Зведена інформація повинна бути доступна широкому колу фахівців сфери комунального водопостачання шляхом організації спеціалізованого Інтернет-ресурсу.

Єдиний інформаційний простір комплексного моніторингу енергоефективності ВГ слід розглядати як сукупність баз і банків даних, технологій їх ведення та використання, інформаційно-телекомунікаційних систем і мереж, які функціонують на основі єдиних принципів і за загальними правилами [356]. Зважаючи на ієрархічність СТС, єдиний ІП також має ієрархічну структуру, містить інформаційні простори нижчого рівня, і повинен забезпечувати ефективний доступ усіх його суб'єктів до наявних інформаційних ресурсів. Отже, під час формування багаторівневого інформаційного простору передбачається горизонтальне та вертикальне інтегрування інформації [346], кожне з яких має свої особливості та специфіку організації (рис. 6.26). Горизонтальне інтегрування передбачає об'єднання інформації, отриманої від об'єктів інформаційної взаємодії одного рівня ієрархії, кожен з яких має свою систему обробки і зберігання інформації, засоби її передачі тощо. Учасники горизонтальної взаємодії виступають як рівноправні партнери, а консолідація інформації в єдиному інформаційному просторі забезпечує можливість порівняльного аналізу їх енергоефективності. Вертикальне інтегрування передбачає агрегування інформації, отриманої від об'єктів інформаційної взаємодії нижчих рівнів, та її консолідацію для подальшої обробки та аналізу на вищому рівні. При вертикальній інформаційній взаємодії об'єкти нижчого рівня є складовими компонентами організаційної структури суб'єктів вищого рівня. Це зумовлює однакові підходи і технології до обробки та зберігання даних на різних рівнях.

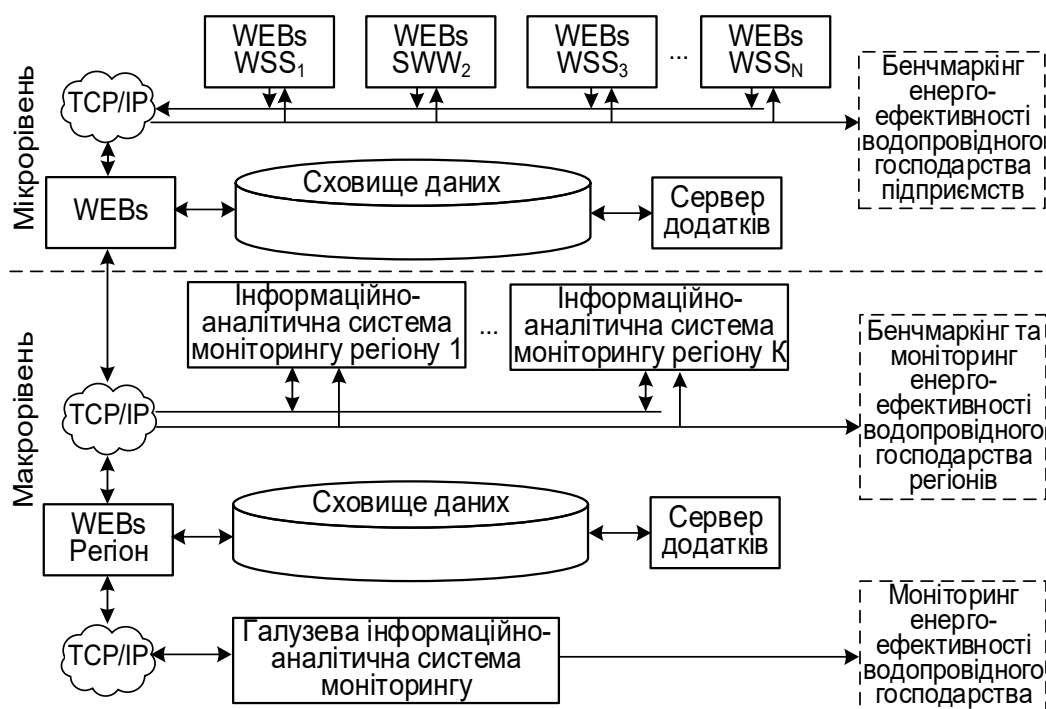


Рисунок 6.26 – Структурна схема організації єдиного багаторівневого інформаційного простору моніторингу енергоефективності ВГ (де TCP/IP – стек протоколів обміну)

Складовими ІАС багаторівневого комплексного моніторингу є інформаційна та аналітична підсистеми. Як технічну основу інформаційної підсистеми слід застосовувати безпроводні мережі [357]. В такому випадку основними компонентами багаторівневої інформаційної підсистеми комплексного моніторингу є веб-орієнтовані засоби збору та захисту даних, засоби попереднього опрацювання даних і сховище даних. Застосування методів обробки і представлення інформації за допомогою web-технологій забезпечує інтеграцію інформації у підсистемі збору та опрацювання даних. Окрім автоматизованого збору даних, доцільним є забезпечення можливості внесення даних вручну шляхом заповнення через web-інтерфейс відповідних форм, організованих з урахуванням інформаційних блоків вихідних атрибутів-характеристик об'єкту дослідження. Сховище даних у хмарному сервісі з відкритими інтерфейсами забезпечить доступ та публікацію інтегрованих даних [357]. Для інтеграції даних на рівні об'єктів моніторингу одного ієрархічного рівня управління простором даних можливе на базі платформи підтримки просторів даних DSSP (Data Space Support Platforms) [357]. На всіх ієрархічних рівнях ВГ засоби доступу до даних повинні базуватися на основі web-

технологій [336]. Передбачається, що обмін даними на всіх рівнях взаємодії з каналуотворюючим обладнанням мережі здійснюватиметься із застосуванням відкритих протоколів, оснащених елементами захисту від несанкціонованого доступу до інформації. Аналітична підсистема призначена для виконання аналітичного та інтелектуального опрацювання даних, оцінювання енергоефективності об'єкту дослідження (підприємства, регіону) тощо.

Побудова багаторівневого інформаційного простору базується на принципі системної інтеграції, що охоплює об'єкти та інфраструктури всіх рівнів моніторингу енергоефективності ВГ з урахуванням вимог конкретного застосування та реалізується з використанням компонентно-орієнтованої технології. Основою реалізації цієї технології є метод декомпозиції. На кожному рівні ієрархії розв'язують задачі відповідної складності, які характеризуються як алгоритмами розв'язання, так і засобами її реалізації [346]. На нижніх рівнях ієрархії збільшується деталізація алгоритмічних, апаратних і програмних засобів. При цьому на вищих рівнях ієрархії програмні та апаратні засоби являють собою впорядковану композицію програмних і апаратних засобів нижчих рівнів ієрархії [346].

6.8 Перспективи застосування єдиного інформаційного простору моніторингу для підвищення рівня енергоефективності водопровідного господарства

Створення єдиного інформаційного простору мікрорівня, в якому буде зібрана інформація про характеристики енергоефективності кожного підприємства ВГ, забезпечує можливість реалізації процедур бенчмаркінгу енергоефективності підприємств ВГ і пошуку кращих практик енергоефективності для підвищення рівня енергоефективності підприємства (рис. 6.27), в тому числі, з урахуванням зовнішньої щодо об'єктів партнерів-бенчмаркінгу. Організація такої взаємодії сприятиме накопиченню інформації про об'єкти ВГ, в тому числі, нижчих рівнів СКВ, та розширенню можливостей порівняльного аналізу, як з точки зору охоплення об'єктів бенчмаркінгу, так і з точки зору формування поля параметрів, зокрема, розширення набору вхідних/вихідних параметрів енергоефективності у порівнян-

ні із застосуванням інформації існуючого поля статистичної звітності (рис. 6.28).

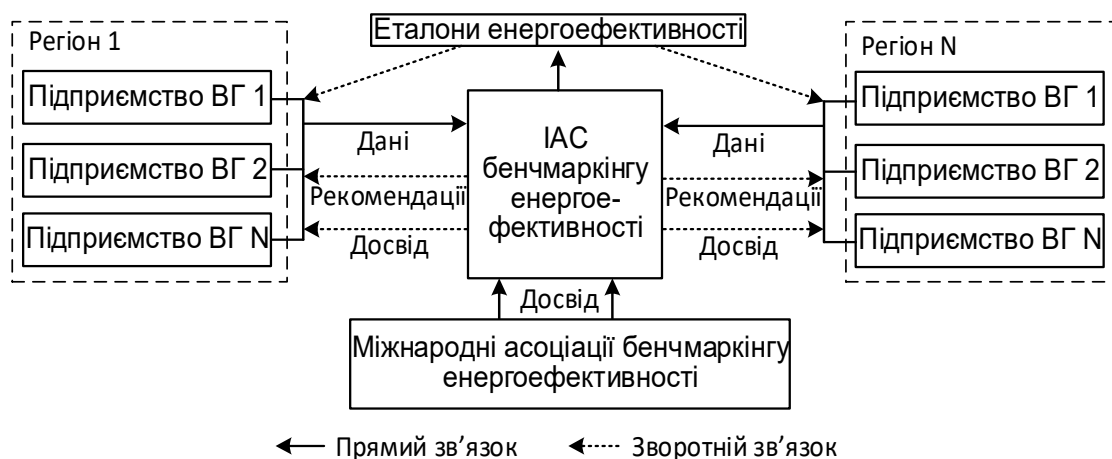


Рисунок 6.27 – Схема взаємодії підприємств в межах ІАС бенчмаркінгу енергоефективності

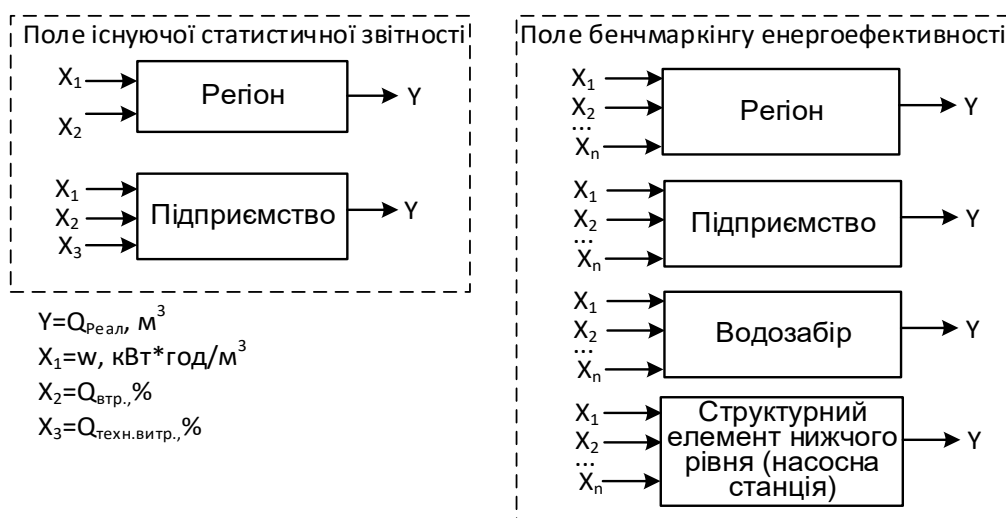


Рисунок 6.28 – Розширення можливостей бенчмаркінгу енергоефективності із застосуванням концепції побудови єдиного інформаційно простору комплексного моніторингу енергоефективності

ІАС моніторингу регіонального рівня, функціонування якої базується на агрегованій інформації про характеристики енергоефективності підприємств, покликана забезпечити виконання таких функцій [346]:

- комплексний моніторинг енергоефективності підприємств ВГ регіону та галузі;
- оцінювання стану, прогнозування та контроль енергоефективності ВГ різних ієрархічних рівнів;
- забезпечення інформаційної взаємодії як між підприємствами ВГ регіону,

так і з регіональними та галузевими центрами енергоефективності;

- інтеграцію та опрацювання інформації про технічні, технологічні та організаційні впливи з точки зору підвищення рівня енергоефективності окремих структурних елементів СКВ та підприємств регіону;

- інтеграцію та аналіз характеристик енергоефективності підприємств, а також їх агрегування та передачу в ІАС галузевого рівня для подальшого агрегування та аналізу енергоефективності ВГ.

Реалізація запропонованої концепції побудови єдиного багаторівневого інформаційного простору комплексного моніторингу енергоефективності є основою підвищення оперативності та якості інформаційного забезпечення управлінських рішень за рахунок своєчасності та достовірності даних щодо енергоефективності об'єктів ВГ різних ієрархічних рівнів; формування єдиної аналітичної бази даних показників енергоефективності для підвищення ефективності аналізу та виявлення потенціалу для енергозбереження; забезпечення моніторингу та аналізу досягнутих ефектів від впровадження заходів з енергозбереження.

6.9 Висновки до розділу

1. Поняття *комплексний моніторинг енергоефективності* базується на забезпеченні інтеграції бенчмаркінгу енергоефективності та таких функцій моніторингу як оцінювання, планування та контроль, організація процедур яких передбачає урахування особливостей технологічного процесу, ієрархічного рівня об'єкту дослідження. Механізм реалізації кожної з процедур комплексного моніторингу передбачає виконання низки послідовних етапів, потребує організації їх інформаційного забезпечення з позицій пірамідального і стратифікованого підходів.

2. Вирішення задачі відбору інформативних атрибутів-характеристик енергоефективності з позицій багатокритеріального вибору, що базується на принципах багатокритеріальної порядкової класифікації та передбачає групування змінних за ступенем їх впливу на ефективність електроспоживання, вимірюваності та змінності, в поєднанні із є застосуванням методу експертних оцінок, забезпечує

структуризацію вихідного інформаційного поля характеристик та формування набору інформативних змінних для кожної задачі комплексного моніторингу енергоефективності з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження. При цьому, прийняття або неприйняття до розгляду певного чинника та формування наборів імовірно інформативних визначальних змінних є обґрунтованим.

3. Формалізація інформаційної технології комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання з використанням об'єктно-орієнтованого підходу забезпечує декомпозицію проблеми на окремі категорії класів (концептуальні класи), кожна з яких містить сукупність класів, що об'єднані процедурами, відповідно, збору інформації про об'єкт дослідження, обчислювальними алгоритмами та моделями, процедурами виконання контролю енергоефективності. Реалізація кожного класу передбачає послідовність кількох розрахункових процедур, а множина існуючих структурних та функціональних відносин виступає елементом алгоритму інформаційного пошуку, тобто, вказує послідовність вибірки інформації, порядок необхідних розрахунків та контрольних процедур. Результатом є інформація, яка збирається в базі даних та базі знань. Частина цієї інформації є вихідною для наступних процедур, а інша частина використовується для прийняття рішення про енергоефективність режиму роботи об'єкту водопостачання.

4. Зважаючи на вимоги до функціональності сучасних інформаційних систем, які передбачають відкритість структури, наявність гнучкого механізму для внесення нових об'єктів та алгоритмів розв'язку прикладних задач, архітектура інформаційного забезпечення комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання як складової інформаційної системи ЕМ підприємства ВГ містить низку взаємодіючих між собою модулів: модулю збору, попередньої обробки та зберігання даних; модулю аналізу даних; модулю прийняття рішень та управлінських впливів, кожен з яких представляє собою сукупність складних підсистем. Забезпечення функціонування запропонованої архітектури вимагає налагодження процедур обміну вхідними і вихідними даними, в тому числі, на базі Web-орієнтованих систем, що дозволить створити єдиний інформаційний простір моніторингу енергоефективності підприємства ВГ та забезпечити можливість об-

робки інформації про параметри режимів та показники енергоефективності структурних елементів та СКВ в цілому, видачі енергоменеджеру інформації, що сприятиме прийняттю дієвих управлінських рішень щодо першочерговості впровадження заходів з енергозбереження та підвищення рівня енергоефективності.

5. Застосування запропонованої концепції організації комплексного моніторингу енергоефективності, що базується на послідовному виконанні запропонованих процедур та передбачає ідентифікацію циклічних змін водоподачі для встановлення планових значень визначальних змінних БРЕ і планування електроспоживання з урахуванням типових умов роботи об'єкту, перевірку відповідності фактичного режиму водоподачі запланованому, виявлення моментів та необхідності коригування планових значень характеристик водоподачі та БРЕ, дало змогу виконати контроль ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання різних ієрархічних рівнів КП «Луцькводоканал» з урахуванням фактичних умов їх роботи, що забезпечило виявлення тенденцій у енергоспоживанні, причин, що їх зумовили, та повідомити енергоменеджера про результати контролю.

6. Інтеграція інформаційних ресурсів підприємств в єдиний багаторівневий інформаційний простір, який передбачає горизонтальне та вертикальне інтегрування інформації, та створення на його основі інформаційно-аналітичних систем регіонального і галузевого рівня є основою підвищення оперативності та якості інформаційного забезпечення управлінських рішень за рахунок отримання і опрацювання даних щодо енергоефективності об'єктів ВГ різних ієрархічних рівнів; формування єдиної аналітичної БД показників енергоефективності для підвищення ефективності аналізу та виявлення потенціалу для енергозбереження; сприятиме ефективному вирішенню задач комплексного моніторингу енергоефективності ВГ, аналізу досягнутих ефектів від впровадження заходів з енергозбереження.

7. Реалізація запропонованої концепції побудови єдиного багаторівневого інформаційного простору комплексного моніторингу енергоефективності потребує розробки спеціалізованої інформаційної платформи для організації обміну інформацією між підприємствами галузі, а також агрегування та передачі даних для їх аналізу на рівні регіону та галузі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано нове вирішення актуальної науково-прикладної проблеми виявлення шляхів підвищення ефективності енергоспоживання об'єктів водопровідного господарства як підсистеми кінцевого енергоспоживання України шляхом розвитку теорії моніторингу енергоефективності складних енерготехнологічних систем та інтегрування його процедур і результатів їх застосування в систему енергоменеджменту з урахуванням технологічних особливостей функціонування об'єктів водопостачання, що забезпечує виявлення тенденцій у енергоспоживанні, причин, що їх зумовили, завдань щодо підвищення рівня енергоефективності та можливих шляхів їх досягнення. Основні результати досліджень та рекомендації щодо їх використання можна узагальнити такими положеннями:

1. На основі аналізу сучасних вимог і тенденцій у сфері енергоефективності обґрунтовано доцільність розвитку теорії комплексного моніторингу енергоефективності як інструменту аналізу ефективності енергоспоживання складних енерготехнологічних систем та виявлення шляхів його підвищення, реалізація якого дозволила забезпечити в комплексі спостереження, оцінювання, планування та контроль ефективності енергоспоживання об'єктів системи, в тому числі, з урахуванням кращих практик енергоефективності.

2. Запропонований підхід до бенчмаркінгу енергоефективності, який передбачає оцінювання рівня енергоефективності шляхом поєднання методів кількісного і якісного багатофакторного аналізу ефективності енергоспоживання, рекомендації щодо вибору яких сформовано з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту дослідження, завдань і типу бенчмаркінгу та об'єкту наслідування, що дозволило на відміну від механізму, рекомендованого в європейському та національному стандартах з бенчмаркінгу, не лише виконати позиціонування об'єктів дослідження за рівнем енергоефективності, а й сформулювати енергоефективні цілі та визначити можливі шляхи його підвищення.

3. Застосування запропонованого способу класифікації об'єктів за рівнем енергоефективності, який базується на побудові набору меж енергоефективності

як розділяючих поверхонь між класами об'єктів, що забезпечило формування впорядкованих за рівнем енергоефективності груп об'єктів з урахуванням їх подібності в структурі вхідних/вихідних змінних, дозволило сформуванню досяжні бенчмарки енергоефективності для об'єктів водопровідного господарства з урахуванням їх досягнутого рівня енергоефективності.

4. Розроблений підхід до ідентифікації циклічних змін водоподачі, зумовлених впливом сезонних і соціальних чинників, який базується на застосуванні теорії розпізнавання образів та побудові здатних до самоорганізації класифікаторів, що дало змогу ідентифікувати типові умови роботи об'єктів водопостачання, що дозволило відповідно до вимог стандартів серії ISO 50000 встановити типові періоди для визначення (спостереження) визначальних змінних і побудови базового рівня електроспоживання. Застосування побудованого двоетапного класифікатора дає змогу встановити належність добових графіків витрати води до одного з типових класів, що дозволяє виконати перевірку відповідності фактичного режиму водоподачі запланованому під час контролю ефективності електроспоживання об'єктів водопостачання.

5. Запропонований спосіб формалізованого опису типових умов роботи об'єктів водопостачання, який базується на аналізі подібних добових графіків витрати води, забезпечив визначення усереднених значень характеристик процесу водоподачі (значення добової витрати води з мережі водопостачання, її складових тощо) та меж їх зміни, а також побудову типових профілів добових графіків витрати води для типових днів кожного сезону та визначення їх параметрів, що дало змогу визначити планові значення визначальних змінних базового рівня електроспоживання з урахуванням впливу сезонних і соціальних чинників.

6. Запропонований підхід до виявлення впливу кліматичних чинників на витрату води з мережі водопостачання, який базується на розробленій процедурі прогнозування добової витрати води та профіля її добового графіка, що передбачає урахування тенденції зміни витрати води та кліматичних чинників, дає змогу виконати коригування планових значень характеристик добової витрати води, профіля її добового графіка витрати води та його параметрів, що дозволило вра-

хувати вплив аномальних значень температури зовнішнього повітря під час визначення базового рівня електроспоживання об'єкту водопостачання.

7. Застосування запропонованої методології моніторингу коливань процесу водоподачі, яка базується на ідентифікації її циклічних змін, зумовлених впливом сезонних та соціальних чинників, а також виявленні впливу аномальних кліматичних чинників на витрату води з мережі водопостачання, забезпечило ідентифікацію та урахування фактичних умов роботи об'єкту водопостачання під час планування електроспоживання та контролю його ефективності.

8. Запропонований підхід до планування електроспоживання об'єктів водопостачання різних ієрархічних рівнів, який базується на використанні побудованих з урахуванням типових умов роботи об'єктів математичних моделей електроспоживання, автоматична структурно-параметрична ідентифікація яких базується на груповому урахуванні визначальних змінних базового рівня електроспоживання, сформованих з урахуванням істотності їх впливу на електроспоживання об'єкту, вимірюваності та можливості контролю, та урахуванні результатів формалізованого опису типових умов об'єкту, доповненого процедурою коригування планових значень визначальних змінних з урахуванням впливу кліматичних чинників, дає змогу адаптувати згідно вимог стандартів серії ISO 50000 визначення базового рівня електроспоживання до коливань процесу водоподачі, що забезпечило врахування фактичних умов роботи об'єкту водопостачання.

9. Запропонований механізм контролю ефективності електроспоживання, який заснований на спільному аналізі контрольних карт, побудованих для електроспоживання, технологічних параметрів процесу водоподачі і показників енергоефективності, та доповнений контролем кліматичних чинників для виявлення необхідності коригування планових та нормативних значень контрольованих параметрів, що в комплексі забезпечило виявлення моментів неефективного електроспоживання і причин, які його зумовили, а також дало змогу оцінити рівень ефективності електроспоживання об'єкту та виявити тенденції до його зміни, в тому числі, із урахуванням кращих зразків ефективного електроспоживання, вибраних зважаючи на фактичний стан об'єкту з точки зору енергоефективності.

10. Застосування запропонованого підходу до виявлення моментів зміни умов роботи об'єкту водопостачання, зумовленого впливом сезонних чинників, що передбачає контроль розладнання процесу прогнозування добової витрати води, у поєднанні із процедурою виявлення розладнання процесу планування електроспоживання, зумовленого удосконаленням об'єкту водопостачання, дає змогу встановити необхідність зміни математичної моделі електроспоживання або ж її корегування, що дозволило забезпечити відповідність базового рівня електроспоживання фактичним умовам роботи об'єкту.

11. Урахування в процедурі контролю запропонованого способу індивідуального налаштування інструментів сигналізації для кожного контрольованого параметру дало змогу врахувати його властивості та характер впливу на ефективність електроспоживання, а також фактично досягнутий рівень енергоефективності об'єкту водопостачання та завдання щодо його підтримання чи підвищення, що забезпечило організацію інформативних повідомлень енергоменеджера про результати контролю.

12. Розроблена концепція комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопровідного господарства, яка базується на інтегруванні процедур бенчмаркінгу енергоефективності, планування електроспоживання та контролю його ефективності як взаємопов'язаних складових системи енергетичного менеджменту та сукупному аналізі їх результатів, що забезпечує виявлення прогресу щодо підвищення рівня енергоефективності об'єктів та можливих шляхів удосконалення технологічного процесу об'єктів водопостачання відповідно до вимог стандартів серії ISO 50000.

13. Запропонована об'єктно-орієнтована формалізація інформаційної технології комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопровідного господарства, розроблена архітектура якої має відкриту структуру, що дозволяє вносити нові процедури та алгоритми для удосконалення механізму моніторингу, передбачає налагодження процедур обміну даними на базі Web-орієнтованих технологій, що дає змогу створити єдиний інформаційний простір моніторингу енергоефективності об'єктів водопровідного господарства, що забезпечує формування

порівняльної інформаційно-аналітичної бази даних та інформаційної бази знань для прийняття управлінських рішень для підвищення рівня енергоефективності.

14. Працездатність та ефективність запропонованих у роботі методів і алгоритмів перевірена шляхом їх застосування на реальних об'єктах водопостачання. Практичну цінність одержаних результатів підтверджено застосуванням запропонованих підходів та процедур під час організації систем контролю та планування електроспоживання об'єктів водопостачання як складових системи енергетичного менеджменту підприємств ВКГ КП «Луцькводоканал» та КП «Тернопільводоканал». Очікуване зниження витрат електроенергії складає 3-5 % в місяць на окремих об'єктах водопостачання та 7-8% в цілому в СКВ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергетична політика за межами країн – членів МЕА: Україна 2012. Основні положення та рекомендації. Загальна енергетична політика. OECD/IEA: International Energy Agency, 2012. 42 с.
2. Законодавче та нормативно-правове стимулювання підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у провідних зарубіжних країнах. Київ: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України «НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр електроенергетики, 2016. 85 с.
3. European Commission. Communication from the Commission - Towards an integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: accelerating the European energy system transformation' (C(2015) 6317 final). Brussels, 15.9.2015. 17 p. URL: <https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/3/2015/EN/3-2015-6317-EN-F1-1.PDF> (дата звернення: 21.12.2019).
4. Денисюк С.П., Стрелкова Г.Г., Пфайфер К.Ф., Стрелков М.Т., Іщенко О.С. Європейські тенденції інноваційного розвитку в енергетичному секторі та сферах кінцевого енергоспоживання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 2. С. 7-19.
5. Стратегія сталого розвитку "Україна - 2020". Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80> (дата звернення: 12.12.2019).
6. Указ Президента України «Про Стратегію сталого розвитку "Україна - 2020" від 12.01.2015 № 5/2015. URL <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/5/2015> (дата звернення: 10.12.2019).
7. Розен В.П., Соколовська І.С., Іншеков Є.М., Стоянова І.І. Удосконалення механізму впровадження директиви 2012/27/EU про енергоефективність шляхом адаптації міжнародних стандартів з енергоменеджменту на національному рівні. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. вип. 4 (43). С. 52- 57.
8. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. *Official Journal of the European Union*. 14.11.2012. L 315. pp. 1-56. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/>

[TXT/?qid=1583062220081&uri=CELEX:32018L2002](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583062220081&uri=CELEX:32018L2002) (дата звернення: 15.12.2019).

9. Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*. L 328, 21.12.2018, p. 210–230 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1581497905598&uri=CELEX:32019L0944> (дата звернення: 15.12.2019).

10. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2020 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 листопада 2015 р. № 1228-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1228-2015-p> (дата звернення: 11.12.2019)

11. План заходів з реалізації Національного плану дій з енергоефективності на період до 2020 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 25 листопада 2015 р. № 1228-р URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1228-2015-p#n11> (дата звернення: 11.12.2019).

12. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-p> (дата звернення: 11.12.2019).

13. Про затвердження плану заходів з реалізації етапу "Реформування енергетичного сектору (до 2020 року)" Енергетичної стратегії України на період до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність". Розпорядження Кабінету Міністрів України від 6 червня 2018 р. N 497-р. URL: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/KR180497.html (дата звернення: 11.12.2019).

14. Денисюк С.П. Особливості реалізації політики енергоефективності - пріоритети України. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. №3. С. 7-19.

15. Євтушенко А.О., Неня В.Г., Сотник М.І., Хованський С.О. Визначення оптимального складу насосної станції системи комунального водопостачання. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2008. Вип. 4/2008 (51). Ч. 1. С. 158-162.

16. Сотник М.І., Бойко В.С., Юрченко М.М. Визначення ефективності експлуатації електромеханічних агрегатів. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. Вип. 2/2013 (22). Ч. 2. С. 226-232.

17. Денисюк С.П. Формування політики підвищення енергетичної ефективності – сучасні виклики та європейські орієнтири. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. №2. С. 7-22.
18. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Розен В.П. Моніторинг ефективності енерговикористання в системах комунального водопостачання : монографія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. 148 с.
19. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Формування енергоефективних режимів насосних станцій комунального водопостачання : монографія. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. 104 с.
20. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В., Давиденко В.А. Планування та контроль електроспоживання в системах комунального водопостачання : монографія. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2020. 160с.
21. Давиденко Л.В. Задача багатокритерійного керування електроспоживанням систем водопостачання та водовідведення. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2009. *Технічні науки*. Вип. 86. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". С. 97-99 .
22. Давиденко Л.В. Формалізація задачі багатокритерійного керування електроспоживанням систем водопостачання та водовідведення. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2010. Вип.101 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». С.19-21.
23. Давиденко Л.В. Формування вихідної сукупності показників рівня енергоефективності об'єктів системи теплопостачання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2014. Випуск 154 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.5-7.
24. Давиденко Л.В. Використання методології бенчмаркінгу для визначення рівня ефективності енергоспоживання в комунальній теплоенергетиці. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №4. С. 15-20.
25. Давиденко Л.В. Принципи побудови інтегрованої системи моніторингу енергоефективності для підприємства водопровідно-каналізаційного господарства. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. № 3 (41). С.107-115.
26. Давиденко Л.В. Управлінська функція бенчмаркінгу енергоефективності та його роль в системі енергоменеджменту підприємства. *Вісник ХНТУСГ ім. П.*

Василенка. *Технічні науки*. 2015. Випуск 165 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.6-8.

27. Давиденко Л.В. Інтеграція бенчмаркінгу в систему енергоменеджменту підприємства. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2016. Випуск 175 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.23-25.

28. Давиденко Л.В. Бенчмаркінг енергоефективності водопровідних господарств: формування групи партнерів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2018. Випуск 196 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.43-44.

29. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Комплексний підхід до задачі енергозбереження та оцінювання рівня енергоефективності водопостачального підприємства як складної системи. *Відновлювана енергетика*. 2010. №1(20). С. 65-70.

30. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Формування інформаційного поля для оцінювання рівня енергоефективності систем комунального водопостачання. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського*. 2010. Вип. 4/2010 (63), Ч.1. С. 50-53.

31. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Оцінювання рівня енергоефективності об'єктів складних енерготехнологічних систем як задача багатомірного порівняння. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2011. Випуск 116 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.76-78.

32. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Використання контрольних карт Шухарта для контролювання ефективності електроспоживання в системах комунального водопостачання. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2012. Вип.1/2012(72), Ч. 1. С.31-35.

33. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Інтерпретація контрольних карт Шухарта для визначення рівня ефективності електроспоживання на об'єктах водопостачання. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2012. Вип.4 (75). С.23-28.

34. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Перевірка можливості використання контрольних карт Шухарта для контролювання рівня ефективності електроспо-

живання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2012. Випуск 130 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.30-32.

35. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Виявлення прихованих взаємозв'язків у вихідній сукупності показників енергоефективності складних виробничих систем. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2013. Вип. 3(80). С.44-49.

36. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Оцінювання рівня енергоефективності складних виробничих систем з позицій багатокритерійної класифікації. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2013. Випуск 142 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.6-8.

37. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Моделювання електроспоживання у складних виробничих системах з урахуванням латентних взаємозв'язків у сукупності показників енергоефективності. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2014. Вип. 2(85). С.40-46.

38. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Коменда Н.В., Ярмольська Н.В. Функції енергетичного моніторингу складних виробничих систем та їх завдання для підвищення рівня енергоефективності. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2014. Випуск 153 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.125-127.

39. Давиденко Л.В. Давиденко В.А., Коменда Н.В. Використання процедур статистичного контролю якості для аналізу ефективності електроспоживання в складних виробничих системах. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2015. Випуск 164 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.104-106.

40. Коменда Т.І., Коменда Н.В., Давиденко Л.В. Округлість, компактність та видовження графіків електричного навантаження. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 2. С. 98-105.

41. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Побудова інформаційного простору моніторингу ефективності енергоспоживання в системах комунального водопостачання. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація/*. 2016. Вип. 29. С. 178-185.

42. Давиденко Л. В., Давиденко В.А., Коменда Н.В. Багатофакторне моделювання електроспоживання в складних виробничих системах з використанням апарату нейронних мереж. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2016. Випуск 175 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.143-145.

43. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Структура системи комплексного контролю ефективності енергоспоживання об’єктів комунального водопостачання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4 (46). С. 81-88.

44. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Процедура побудови базового рівня електроспоживання об’єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 3 (49). С.31-37.

45. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Коменда Н.В. Принципи налаштування інструментів сигналізації в системі контролю енергоефективності виробничих об’єктів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2017. Випуск 187 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.18-20.

46. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Процедура планування електроспоживання об’єктів водопостачання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. №6. С.49-54.

47. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Урахування циклічних змін процесу водоподачі під час контролю ефективності електроспоживання насосних станцій. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. Вип.2. С. 68-74.

48. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Побудова правил дискримінації добових графіків витрати води з мережі водопостачання з урахуванням сезонних та соціальних чинників. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2018. №3/2018(110). С. 20-25.

49. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Нейромережеве моделювання електроспоживання в системі комунального водопостачання з урахуванням сезонних змін водоподачі. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2018. Випуск 195 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.78-79.

50. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Моделювання електроспоживання насосної станції водоподачі. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2019. Випуск 1/2019 (114). С. 20-26.
51. Розен В.П., Давиденко Л.В., Волинець В.І., Давиденко В.А., Давиденко Н.В. Бенчмаркінг енергоефективності електротехнічних комплексів вугільних шахт. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2019. Випуск 4/2019 (117). С. 134-140.
52. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Моделювання електроспоживання в системі комунального водопостачання методом групового урахування аргументів *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2019. Випуск 203 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.80-81.
53. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Принципи інформаційного забезпечення комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2019. Випуск 204 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.8-10.
54. Davydenko L. Indicators System Creation For The Energy Efficiency Benchmarking Of Municipal Power System Facilities. *Problemele energeticii regionale*. 2015. 1 (27). pp. 58-70.
55. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V., Davydenko N. Formalization of Energy Efficiency Control Procedures of Public Water-Supply Facilities. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017. Vol. 543. pp. 196-202.
56. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V. and Davydenko N. Construction of the Energy Baseline of the Pumping Station of Water Supply Taking into Consideration Cyclic Changes in Water Consumption. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2019 – Proceedings*. 2019. IEEE Catalog Number (IEEE Part Number): CFP19U02-USB. pp. 250-262.
57. Korobiichuk I., Davydenko L., Davydenko V., Davydenko N. Information support the operative control procedures of energy efficiency of operation modes of municipal water supply system facilities. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. vol. 920. pp. 571-582.
58. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V., Davydenko N. Control of Operation Modes Efficiency of Complex Technological Facilities Based on the

Energy Efficiency Monitoring. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. Proceedings - DSMIE-2019. pp. 531-540.

59. Davydenko N., Korobiichuk I., Davydenko L., Nowicki M., Davydenko V. Identification of cyclic changes in the operation mode of the production facility based on the monitoring data. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1044. pp. 189-197.

60. Korobiichuk I., Davydenko L., Davydenko N., Davydenko V. Control of the Operation Mode of the Production Facility Based on the Relevant Characteristics of the Technological Process. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 1140. pp 57-66.

61. Davydenko L., Davydenko N. Integration of procedures of benchmarking and energy efficiency control in energy management system of municipal water supply enterprise. *Energetica Moldovei-2016: Aspecte regionale de dezvoltare : Rapoarte*. Chişinău: S. n., 2016. Ed. 3. pp.123-131.

62. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Комплексне оцінювання рівня енергоефективності водогосподарств як складних виробничих систем. *Промислова електроенергетика та електротехніка*. 2010. №.6. С 20-24.

63. Давиденко Л.В. Завдання та основні етапи системи бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів складних виробничих систем. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №10. С. 15-20.

64. Давиденко Л.В. Механізм бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів складних виробничих систем та принципи його реалізації. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №11. С. 11-18.

65. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Призначення процедур комплексного контролю рівня ефективності енергоспоживання об'єктів водопостачання в системі енергоменеджменту водопостачального підприємства. *Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ*. 2016. С. 73-79.

66. Davydenko N., Davydenko V., Davydenko L. Information support for the procedure of power consumption planning in the municipal water supply system. *Modeling, Control and Information Technologies*. 2019. No. 3. pp. 29-32.

67. Давиденко Л.В. Бенчмаркінг енергоефективності об'єктів складних виробничих систем: основні складові та принципи їх реалізації. в кн.: Економічна безпека територіально-виробничих комплексів: енергетика, екологія, інформаційні технології : **монографія** / Коцко Т. А., Чеховська М. М., Лісовські О. Л. [та ін.]; за наук. ред. Лук'яненка С.О., Караєвої Н. В. Київ : «МП Леся», 2015.С. 115- 119)

68. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Визначення ефективності енерговикористання у виробничих системах за допомогою енергетичного моніторингу. *Підвищення ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції (14-16.06.2012). Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2012. С. 16-18.

69. Давиденко Л.В., Негодюк Р.В. Рейтингування об'єктів складної виробничої системи як засіб визначення їх рівня енергоефективності. *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції (27-29.06.2014). Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2014. С. 79-80.

70. Давиденко Л.В. Принципи побудови інтегрованої системи моніторингу енергоефективності для підприємства водопровідно-каналізаційного господарства. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'15*. 36. тез доповідей II міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (19-21.05.2015). Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 39-43

71. Коменда Т.І., Коменда Н.В., Давиденко Л.В. Компактність графіків електричного навантаження. *Оптимальне керування електроустановками. ОКЕУ-2015*. 36. тез доповідей III міжнародної науково-практичної конференції (14-15.10.2015). Вінниця: ВНТУ, 2015. С. 31.

72. Давиденко Л.В. Призначення та завдання моніторингу ефективності енергоспоживання в складних виробничих системах. *Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах*. матеріали доповідей I всеукраїнського наукового семінару (29.04.2015). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 34-37.

73. Давиденко Л.В. Використання методології бенчмаркінгу для оцінювання рівня ефективності енерговикористання. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах*. Матеріа-

ли доповідей V всеукраїнського наукового семінару (15.05.2015). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 56-58

74. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Завдання та принципи організації комплексного контролю ефективності енерговикористання в системах комунального водопостачання. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*. Збірник наукових праць XVII міжнародної науково-технічної конференції (17-19.05.2016). Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 1/2016 (4). С. 201-203

75. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Система комплексного контролю енергоефективності режимів роботи об'єктів комунального водопостачання. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. Збірник наукових праць III міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (30.05-01.06.2016). Київ, НТУУ «КПІ», 2016. С. 94-95

76. Давиденко Л.В. Інтегрована системи моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання. *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали V міжнародної науково-технічної конференції (26-28.05.2016). Луцьк: РВВЛНТУ, 2016. С. 55-56

77. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Принципи побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. Збірник наукових праць IV міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (25-27.04.2017). Київ, НТУУ «КПІ», 2017. С. 112-113.

78. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Monitoring and Targeting Systems об'єктів водопостачання: процедура планування ефективного електроспоживання. *Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ'2017*. Тези IV Міжнародної науково-технічної конференції (11-13.10.2017). Вінниця: ВНТУ, 2017. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey/schedConf/presentations> (дата звернення: 11.12.2019).

79. Давиденко Л.В. Аспекти комплексного контролю енергоефективності режимів роботи об'єктів комунального водопостачання. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальних господарствах та на промислових підприємст-*

вах. Матеріали доповідей VI всеукраїнського наукового семінару (01.06.2017). Луцьк: IBV Луцького НТУ, 2017. С.33-36

80. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Виявлення та урахування циклічних змін водоподачі під час контролю ефективності електроспоживання насосних станцій. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. зб. наук. праць V міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (17-19.04.2018). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. С.101-102.

81. Давиденко Л.В. Принципи застосування концепції бенчмаркінгу для аналізу енергоефективності виробничих об'єктів. *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції (20-23.06.2018). Луцьк : IBV Луцького НТУ, 2018. С. 61-64.

82. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Давиденко Н.В. Побудова моделі електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням циклічних змін водоспоживання. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій*. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції (20-21.06.2019). Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2019. С. 7-9

83. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Призначення бенчмаркінгу в системі контролю енергоефективності виробничих об'єктів. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах*. Матеріали доповідей VII всеукраїнського наукового семінару (21-22.06.2019). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2019. С. 34-37.

84. Свідоцтво про авторське права на технічний твір № 37831. Методика оцінювання рівня ефективності енерговикористання на об'єктах підприємства комунального водопостачання та водовідведення / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Заявка № 37897 від 09.02.2011. Зареєстр. 08.04.2011

85. Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 83989. Процедура формалізації циклічних змін водоподачі насосних станцій комунального водопостачання / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 85055 від 06.11.2018. Зареєстр. 26.12.2018. Опубл. 25.01.2019. Бюл. № 51. С.851

86. Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 85617. Процедура побудови базового рівня електроспоживання насосної станції водопостачання /

Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 85617 від 31.01.2019. Зареєстр. 11.02.2019. Опубл. 26.04.2019. Бюл. № 52. С.644

87. Свідоцтво про авторське право на науковий твір №88363. Методика контролю ефективності електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 89934 від 16.04.2019. Зареєстр. 08.05.2019. Опубл. 26.07.2019. Бюл. № 53. С.433.

88. Півоваров О.А., Дубницький В.І., Федулова С.О. Оцінка інвестиційної привабливості водопровідно-каналізаційного господарства як базової галузі національного господарства. Наука, технології, інновації. 2017. № 1 (1). С. 55-62.

89. Галузева програма енергоефективності та енергозбереження у житлово-комунальному господарстві на 2010-2014 рр. Київ. 2009. (Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства №352 від 10.11.2009). URL: <http://text.normativ.ua/doc17772.php> (дата звернення: 11.10.2019).

90. Бойко В.С., Сотник Н.И., Сотник И.Н. Энергоэффективная насосная станция третьего подъема. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 3. С. 62-65.

91. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2011 році. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2012. 642 с.

92. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2012 році. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2013. 450 с.

93. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2013 році. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2014. 454 с.

94. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2014 році. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2015. 423 с.

95. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2015 році. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2016. 421 с.

96. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопоста-

чання в Україні у 2016 році. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2017. 407 с.

97. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2017 році. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та ЖКГ України, 2018. 382 с.

98. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздухоудовных установках. Москва : Энергоатомиздат, 2006. 360 с.

99. Капанский А.А. Моделирование электропотребления в технологической системе водоснабжения. *Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого*. 2016. № 2. С. 74-85.

100. Бойко В.С., Сотник Н.И., Сотник И.Н. Антикризисное управление деятельностью водоснабжающих предприятий Украины на основе энергосбережения. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2008. Вип. 3/2008 (50). Ч.2. С. 158-161

101. Денисюк С.П., Бориченко О.В. Теоретичні основи побудови систем енергетичного менеджменту в Україні. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2015. № 1. С. 7-17.

102. Рубан-Максимець О.О. Особливості розрахунку показників енергетичної ефективності на базі статистичної звітності України. *Проблеми загальної енергетики*. 2009. №20 (2009) С.-21-26.

103. ISO 50001:2011(E) Energy management systems - Requirements with guidance for use. ANSI, 2011. 23 p.

104. ISO 50001:2018(E) Energy management systems - Requirement with guidance for use (second edition). ANSI, 2018. 30 p.

105. ДСТУ ISO 50001:2014. Енергозбереження. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання (ISO 50001:2011, IDT). Київ : Мінекономрозвитку України, 2015. 27 с.

106. Гнедой Н.В., Маляренко Е.Е. Энергоэффективность и определение потенциала энергосбережения в нефтепереработке. Киев : Наукова думка, 2008. 182 с.

107. Мітрахович М. М., Герасимчук І. С. Методика розрахунку основних показників енергоефективності підприємства. *Наукоємні технології*. 2009. № 3. С. 93-95

108. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / Ковалко М.П., Денисюк С.П.; Відпов. Ред.. Шидловський А.К. Київ : УЕЗ,

1998. 506 с

109. Маляренко О.Є. Показники енергоекономічного аналізу для визначення ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів у багато продуктових виробництвах промислової продукції. *Проблеми загальної енергетики*. 2010. Вип. 1(21). С.40-46.

110. Пігур Н.В., Погребенник В.Д. Основні підходи до оцінювання ефективності комплексних систем захисту інформації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: технічні науки*. Черкаси, 2012. № 2. С. 42-47.

111. Находов В.Ф., Бориченко О.В. Ймовірісно-статистичний підхід до побудови енергобалансів виробничо-господарських об'єктів. *Промислова електроенергетика та електротехніка: Промелектро*. 2007. № 6. С. 45–54.

112. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О., Якобчук І.В. Виявлення «проблемних» ділянок схеми електропостачання для верифікації розрахункових електробалансів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2/8 (74). С. 4–10.

113. ДСТУ 4714:2007 Енергозбереження. Паливно-енергетичні баланси промислових підприємств. Методика побудови та аналізу. Київ : Держстандарт України, 2007. 25 с.

114. Розен В.П., Пархоменко Р.А., Синчук И.О., Мельник О.Е. Электробаланс и моделирование его слагаемых для энергоёмких технологических процессов подземных железорудных производств. *Электротехника, радиотехника, телекоммуникации, и электроника*. 2013. С. 19–30.

115. Новосельцев О.В. Системні питання формування оптимальних паливно-енергетичних балансів за умов конкуренції в енергетиці. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. №13. С. 7-11.

116. Енергетичний аудит об'єктів житлово-комунального господарства : Монографія / Розен В.П., Соловей О.І., Бржестовський С.В., Чернявський А.В., Розен П.В.; Під заг. ред. В.П. Розена, О.І. Солов'я. Київ : ПП ВКФ «Дельта Фокс», 2007. 224 с.

117. Энергетический менеджмент / Праховник А.В., Соловей А.И., Прокопенко В.В. и др. Київ : ІЕЕ НТУУ «КПІ», 2001. 472 с.

118. Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали.

В 2-х т. За ред. Жовтянського В.А., Кулика М.М., Стогнія Б.С. Київ : Академперіодика, 2006.

119. Сухонос М.К. Разработка системы оценки энергоэффективности энергоинфраструктуры предприятия. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2011. №4 (86) С. 16-21

120. Базюк Т.М., Огієвич О.М. Оптимізація інформаційних потоків при визначенні показників енергоефективності на підприємстві. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. №2. С. 129-135

121. Шевцов А.І., Бараннік В.О., Земляний М.Г., Рязова Т.В. Енергоефективність у регіональному вимірі. Проблеми та перспективи. Аналітична доповідь. Дніпропетровськ, 2014. 78 с.

122. Денисюк С.П. ISO 50001: цілі стандарту та перспективи його впровадження в Україні. Київ : ЮНІДО, 2015. 104 с.

123. Находов В.Ф., Пецкова О.О., Іванько Д.О. Моніторинг показників енергоспоживання в системі енергетичного менеджменту. *Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ*. 2015. С. 210-217.

124. European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency. *Seville: Institute for Prospective Technological Studies, European IPPC Bureau*. 2008. 430 p. URL: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/ene.html> (дата звернення: 21.11.2019).

125. Розен В.П., Тишевич Б.Л., Розен П.В. Методологія бенчмаркінгу енергоефективності для промисловості України. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. №06 (100). С. 9-19

126. Boxwell R. J. Benchmarking for Competitive Advantage. New York : McGraw-Hill Professional Publishing, 1994. 225 p.

127. Sontag B., Hirzeli S., Bender O., Kloos H., Laubach M., Wallkötter R., Rohde C. Energy-benchmarking within companies: insights from benchmarking practice. *ECEEE – 2014. Industrial summer study – retool for competitive and sustainable industry*. 2014. pp. 637-646.

128. EN 16231:2012 Energy Efficiency Benchmarking Methodology. Brussels : CEN-CENELEC Management Centre, 2012. p. 24.

129. ДСТУ EN 16231:2017 (EN 16231:2012, IDT) Методологія бенчмаркінгу

енергоефективності (Energy efficiency benchmarking methodology). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 19с

130. Global Industrial Energy Efficiency Benchmarking. An Energy Policy Tool: Working Paper. Vienna, Austria : United Nations Industrial Development Organization, Vienna International Centre, 2010. 76 p. URL: <http://www.unido.org> (дата звернення: 18.11.2019)

131. Иншеков Е.Н. Стандарт ИСО 50001 «Системы энергетического менеджмента» от истории создания к промышленному внедрению. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. №10 (116). С. 53-55.

132. Киямов И.К., Алафузов И.Г. Ключевые принципы энергетического менеджмента в энергосбережении. *Вестник экономики, права и социологии*. 2016. №1. С. 38- 42

133. Національна доповідь «Цілі розвитку тисячоліття Україна-2010». Київ : Програма розвитку ООН в Україні, 2010. 108с.

134. Праховник А.В., Иншеков Є.М. Визначення термінів і одиниць виміру та аналіз енергетичної ситуації. *Вісник СумДУ. Серія Економіка*. 2006. Вип. 5 (89). С. 22-30.

135. Липкин И. А. Энергоменеджмент – инструмент эффективного управления. *Мясные технологии*. 2012. № 4. С. 6-9.

136. Осмола И.И., Примакова И.Н. Внедрение систем энергетического менеджмента в соответствии с СТБ ISO 50001 – требование времени. *Стандартизация*. 2013. № 5. С. 58-61.

137. Иншеков Є.М., Нікітін Є.Є., Тарновський М.В., Чернявський А.В. Посібник з муніципального енергетичного менеджменту. Київ : Поліграф плюс, 2014. 238 с.

138. Денисюк С.П., Бориченко О.В. Інтегровані системи енергоменеджменту як основа побудови сучасної політики енергоефективності вищих навчальних закладів. *Вісник КНУТД*. 2013. № 6 (74). С. 212-220.

139. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О. Контроль ефективності енерговикористання в системі енергетичного менеджменту. *Вісник КНУТД*. 2013. № 6. С. 67-77.

140. Находов В.Ф., Бориченко О.В. Концепція побудови інтегрованих систем

контролю ефективності використання електричної енергії на виробничо-господарських об'єктах. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. № 1. С. 72-78.

141. Розен В.П., Соловей О.І., Чернявський А.В. Організаційні заходи щодо впровадження та експлуатації системи енергетичного менеджменту на підприємстві. *Енергетика: економіка, технологія, екологія*. 2002. № 1. С. 66-70.

142. ДСТУ ISO 50006:2016. Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання рівня досягнутої/досяжної енергоефективності з використанням базових рівнів енергоспоживання та показників енергоефективності. Загальні положення та настанова (ISO 50006:2014, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 30 с.

143. Півняк Г.Г., Випанасенко С.У., Хованська О.І. та ін. Системи енергоменеджменту та їх математичне забезпечення. Донецьк : НГУ, 2013. 214 с.

144. ДСТУ ISO 50004:2016. Настанова щодо впровадження, супровід та поліпшення системи енергетичного менеджменту (ISO 50004:2014, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 38 с.

145. Основы целевого энергетического мониторинга. Москва : ЭНИЗАН, АСЭМ, 1997. 38 с.

146. Розен В.П., Чернявський А.В., Ячник Е.А., Литвин В.И. Энергетический мониторинг программ энергосбережения учреждений бюджетной сферы. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2009. Вип.3 (56), Ч. 2. С. 190-194.

147. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О. Вибір математичної моделі для встановлення “стандартів” енергоспоживання виробничих об'єктів на основі багатокритеріального підходу. *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. 2014. № 1. С. 20-28.

148. Праховник А.В., Іншеков Є.М. Енергетичний менеджмент: суттєві фактори, цілі, ієрархія, об'єкт діяльності. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2004. Вип. 3/2004 (26). С. 75-79.

149. Pooley J. Quick Start Guide to Energy Monitoring & Targeting (M&T). *Effective Energy Management Guide*. 2005. URL: <http://www.oursouthwest.com/SusBus/susbus9/m&tguide.pdf>. (дата звернення: 18.10.2019).

150. Ковалко О.М., Новосельцев О.В., Євтухова Т.О Вступ до теорії енергоефективності багаторівневих систем: методи та моделі енергетичного менеджменту в системі житловокомунального господарства. Київ: НАН України, Інститут

технічної теплофізики, 2014. 252 с.

151. Праховник А.В., Ковалко М.П., Іншеков Є.М. Ієрархічна система енергетичного менеджменту - основа енергоефективної економіки. *Праці Ін-ту електродинаміки НАНУ*. Спеціальний випуск. 2005. С. 7-11.

152. Нікітін Є.Є. Підвищення енергетичної ефективності систем централізованого теплопостачання : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.01. Київ, 2015. 42 с.

153. Дешко В.І., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М., Суходуб І.О., Сотник М.І., Соколова Н.П. Досвід створення та функціонування системи енергоменеджменту у ВНЗ. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 2. С. 34-45.

154. Цюцюра С.В., Аніщенко В.О., Ткаленко Н.В. Інформаційна база системи енергетичного менеджменту промислового підприємства. *Управління розвитком складних систем*. 2010. Вип. 2. С. 63-67.

155. Розен В.П., Ткаченко В.Ф. Энергетический мониторинг зданий высших учебных заведений. *Проблемы региональной энергетики*. 2013. Вып. 2. С. 108-112.

156. Чернявський А.В., Якобюк Д.В. Інформаційно-аналітичні засоби моніторингу енергоефективності об'єктів нафтодобувної галузі. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 2. С. 106-111.

157. Flizikowski J., Bielinski K. Technology and Energy Sources Monitoring: Control, Efficiency, and Optimization. USA : IGI GLOBAL, 2013. 260 p.

158. Чернявський А.В., Якобюк Д.В., Якобюк І.В. Аналітичне забезпечення енергетичного моніторингу. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. № 2 (133). С. 41-45.

159. Grega W. Information Technologies Supporting Control and Monitoring of Power System. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2012. No. 5. pp. 193-197.

160. Борукаев З.Х., Евдокимов В.Ф., Остапченко К.Б. Информационно-аналитическая система мониторинга оптового рынка электроэнергии. *Моделирование и информационные технологии*. 2002. Вып. №14. С.3-13.

161. Парфененко Ю.В., Шендрик В.В., Неня В.Г., Окопний Р.П. Інформаційно-аналітична система моніторингу та прогнозування теплозабезпечення будівель. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. 2013. №

743. Ч.1. С. 38-43.

162. Никитин Е.Е. Оперативный контроль и анализ эффективности использования природного газа на промышленном предприятии. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2011. № 1. С. 17-28.

163. Бориченко О.В. Інтегрована система контролю ефективності використання електричної енергії у виробництві : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01. Київ: НТУУ КПІ, 2011. 24 с.

164. Nakhodov V., Baskys A., Borichenko E., Ivanko D. Application of sequential analysis of Wald for energy efficiency monitoring. *Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*. 2016. IEEE 4rd Workshop on Advances in Vilnius. pp.1-6.

165. Hilliard A., Jamieson G.A. Monitoring & Targeting Energy in Practice: A Field Study. Toronto : University of Toronto, King's College Rd. 2014. 11 p.

166. Jones P. Getting started with Monitoring & Targeting (M&T). *Fundamental Series*. 2004. №7. P. 29–32.

167. Monitoring and targeting: Techniques to help organisations control and manage their energy use. London: Carbon Trust. No. CTG008. 2008. 33p.

168. Іванько Д.О. Оперативний контроль енергоефективності виробничих систем на основі ймовірнісно-статистичного підходу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01. Київ: НТУУ КПІ, 2017. 24 с.

169. Находов В.Ф., Бориченко О.В. Процес контролю виконання встановлених «стандартів» в системах оперативного контролю ефективності енерговикористання. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Гірництво*. 2014. Вип. 24. С. 111-119.

170. Находов В.Ф., Стеценко І.В., Бедерак Я.С. Застосування методів самоорганізації математичних моделей енергоспоживання для встановлення «стандартів» в системах оперативного контролю енергоефективності. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2012. № 5 (99). С. 23-33.

171. Стеценко І.В., Бедерак Я.С. Побудова багатофакторних математичних моделей енергоспоживання на хімічному виробництві. *Енергетика. Енергосбережение. Энергоаудит*. 2013. № 7. С. 41-48.

172. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О., Єгорова І.О. Комплексний підхід до визначення складу чинників, що впливають на величину енергоспожи-

вання при впровадженні систем оперативного контролю енергоефективності. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 2. С. 68-77.

173. Сокур М.І., Білецький В.С., Сокур Л.М., Сокур І.М. Математичне моделювання електроспоживання на дробильно-подрібнюючих комплексах ГЗК. *Збагачення корисних копалин*. 2017. Вип. 65(106). С. 72-77.

174. Розен В.П., Курбака Г.В., Мильніченко С.М. Модель оцінки ефективності використання планової величини електричної потужності промислових підприємств. *Вісник ЧДТУ*. 2013. № 3. С. 56-60.

175. Находов В.Ф., Іванько Д.О., Головка А.В. Вибір методів математичного моделювання процесів енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. Спецвипуск. С. 20–27.

176. Ляхомский А.В., Фомин В.В. Многофакторное моделирование процесса электропотребления при переработке кимберлитовых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. Отдельный выпуск № 8. Электрификация и энергосбережение. С. 29-34.

177. Випанасенко С.І. Прогнозування обсягів електроспоживання вугільної шахти. *Науковий вісник НГУ*. 2011. №6. С. 93-98.

178. Бурый С. В. Разработка метода перспективного планирования электропотребления с применением регрессионных моделей. *Технические средства и информационные системы, используемые для реализации функций управления*. 2013. № 3. С. 64 – 68.

179. ДСТУ ISO 50015:2016 Системи енергетичного менеджменту. Вимірювання та верифікація рівня досягнутої/досяжної енергоефективності організацій. Загальні принципи та настанова (ISO 50015:2014, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 19 с.

180. Розен В.П., Тишевич Б.Л., Городецький В.Г., Розен П.В. Бенчмаркінг як засіб підвищення рівня енергоефективності промисловості України. *Вісник НТУУ 166 «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2012. Вип. 22. С. 166-171.

181. Rosen V.P., Tyshevych B.L., Inshekov E.N., Rosen P.V. Benchmarking methodology for increasing of energy efficiency of industry of Ukraine. *Problemele energeticii regionale*. 2012. 2(19). P. 73-84.

182. Ratjen G., Lackner P., Kahlenborn W., Gsellmann Ju. Energy Efficiency Benchmarking Methodological foundations for the development of energy efficiency benchmarking systems pursuant to EN 16231. Berlin, 2013. 17 p. URL: <https://www.adelphi.de/en/publication/energy-efficiency-benchmarking> (дата звернення: 17.11.2019).

183. Tana Y.S., Tjandraa T.B., Songa B. Energy Efficiency Benchmarking Methodology for Mass and High-Mix Low-Volume Productions. *Procedia CIRP*. 2015. №29. 120-125.

184. Zogla, L., Zogla, G., Beloborodko, A., Rosa, M. Process benchmark for evaluation energy performance in breweries. *Energy Procedia*. 2015. 72. 202-208.

185. Лафлер Б. Бенчмаркінг: ефективність українських міст і областей : посібник. Проект “Розбудова спроможності до економічно обґрунтованого планування розвитку областей і міст України”. Київ, 2012. 44 с. URL: http://www.academy.gov.ua/doc/mijnar_spivrob/mizhnar_proekt/pdf (дата звернення: 17.09.2019).

186. Kreitleina S., Scholzb M., Franke J. (2017). The Automated Evaluation of the Energy Efficiency for Machining Applications based on the Least Energy Demand. *Procedia CIRP*. 61. 404-409.

187. Чернявський А.В., Мидловець О.А. Застосування технології бенчмаркінгу для порівняння енергоефективності вищих навчальних закладів. *Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ*. 2013. С.282-288.

188. Розен В.П., Яковчук І.В., Шарий І.М. Оцінювання енергоефективності в навчальних закладах з використанням правил ранжування за показниками впливу на рівень їх енерговикористання. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2017. Вип. 33. С. 89-99.

189. Розен В.П., Великий С.С. Застосування бенчмаркінгу енергоефективності на прикладі житлово комунального сектору України. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2017. № 25 (101). С. 394-401.

190. Праховник А.В., Іншеков Є.М. Енергозбереження України: стратегія та гармонізація до світових тенденцій. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Спеціальний випуск. 2004. С. 22-27.

191. Анфилов В.С., Смельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в

управлении. Москва: Финансы и статистика, 2002. 268 с.

192. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник. Под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. Москва: Финансы и статистика, 2006. 848 с.

193. Гарасьова Н.Ю., Величко Т.В. Оцінка ефективності роботи регульованого електроприводу насосу при змінному графіку водоспоживання. *Наукові записки*. 2014. Вип. 15. С. 86-88.

194. Бойко В.С., Неня В.Г., Сотник М.І., Хованський С.О. Аналіз частотного регулювання відцентрових насосів водопостачання з метою енергозбереження. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2009. Вип. 4/2009 (57). Ч. 1. С. 168-171.

195. Алексеева Ю.А., Коренькова Т.В. К вопросу построения модели водопотребления в гидротранспортных комплексах. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2008. Вип. 4/2008 (51). Ч. 1. С. 136-139.

196. Шушкевич Е.В. Эффективное управление системой подачи и распределения воды Московского мегаполиса. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2011. № 1. С. 24-30.

197. Романенко С.С., Коренькова Т.В. Інноваційні підходи в задачах підвищення ефективності гідротранспортних комплексів. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*. 2011. № 1/2011 (1). С. 108-109.

198. Плешков П.Г., Гарасьова Н.Ю., Величко Т.В. Побудова системи автоматизованого управління і моніторинга енергетичних параметрів насосної станції. *Наукові записки*. 2010. Вип. 10. Ч. 2. С. 123-126.

199. Романчук С.М. Направления развития городских АСУ ТП водоснабжения и водоотведения. *Наукові праці ДонНТУ. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"*. 2014. № 1 (19). С. 131-138.

200. Показатели энергоэффективности: основы формирования политики. OECD/IEA : International Energy Agency, 2014. http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Essentials_RU_final_FULL.PDF (дата звернення: 17.10.2019)

201. Денисюк С.П., Василенко В.І. Енергетичні, економічні та екологічні показники енергоефективності. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016.

№ 1. С. 33-44.

202. Плют В. Сравнительный многомерный анализ в эконометрическом моделировании: Пер. с польск. В. В. Иванова. Москва: Финансы и статистика, 1989. 176 с.

203. Вітлінський В. В. Моделювання економіки. Київ: КНЕУ, 2003. 408 с.

204. Хайлук С.О. Використання байесівського підходу до оцінки ефективності банківської системи. *Проблеми економіки*. 2012. № 2. С.75-77.

205. Ким Дж., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. Под ред. Енюкова И.С. Москва: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

206. Сошникова Л.А., Тамашевич В.Н., Уебе Т., Шеффер М. Многомерный статистический анализ в экономике. Под ред. проф. Тамашевича В.Н. Москва: ЮНИТИ-ДАНА, 1999. 598 с.

207. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д. Под ред. С.А. Айвазяна. Москва: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

208. Моргунов Е.П. Многомерная классификация на основе аналитического метода оценки эффективности сложных систем. Автореф. дисс. ... канд. техн. науки : 05.13.01. Красноярск: НИИ систем управления, волновых процессов и технологий, 2003. 20 с.

209. Терещук О.І., Сахно Є.Ю., Маргасов Д.В., Корзаченко М.М. Моніторинг енергоефективності малоповерхових будівель : монографія. Чернігів: ЧНТУ, 2018. 356 с.

210. Дейна А. Ю. Статистична оцінка енергоефективності виробництва та споживання паливно-енергетичних ресурсів в Україні. *Статистика України*. 2017. №3. С. 45-52.

211. Салашенко Т.І. Особливості оцінки енергоефективності регіонів з позиції забезпечення їх сталого розвитку. *Ефективна економіка*. 2012. № 9. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=1397>. (дата звернення: 27.12.2019)

212. Маргасов Д.В., Сахно Е.Ю., Скітер І.С. Розробка моделі та модифікація методу аналізу ієрархій для оцінки рівня енергоефективності. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 5(2). С. 26-32.

213. Гасанов Г.Б. Рейтинговая оценка и регулирование деятельности распределительных электрических сетей в условиях нечеткости : монография. Львов : Львівська політехніка, 2006. 116 с.

214. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. Москва : Радио и связь, 1981. 316 с.

215. Практичне застосування Байєсівського аналізу при здійсненні фінансового моніторингу в банках : монографія / Кузьменко О.В., Медвідь Т.А., Левченко Л.Г. та ін. За заг. ред. С.О. Дмитрова. Суми: ДВНЗ “УАБС НБУ”, 2011. 46 с.

216. Крючковский В.В., Петров Э.Г., Соколова Н.А., Ходаков В.Е. Интроспективный анализ. Методы и средства экспертного оценивания : монография. Под ред. Э.Г. Петрова. Херсон : Гринь Д.С., 2011. 168 с.

217. Ray S.C. Data Envelopment Analysis theory and techniques for economics and operations reseach. Cambridge : Cambridge University Press, 2011. 366 p.

218. Понькина Е.В., Лобова С.В., Курочкин Д.В., Межин С.А. Количественная оценка влияния технологических и социо-экономических факторов на эффективность деятельности сельскохозяйственных предприятий Алтайского края на основе методов Data Envelopment Analysis (DEA) и Stochastic Frontier Analysis (SFA). Барнаул : Изд-во Алт. унт-та, 2013. 88 с.

219. Лиссица А., Бабичева Т. Анализ оболочки данных (DEA) – современная методика определения эффективности производства. Discussion Paper. Institute of Agricultural Development in Central and Eastern Europe. 2003. № 50. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:3:2-23263> (дата звернення: 15.12.2019)

220. Cooper W., Seiford L., Zhu J. Data Envelopment Analysis: History, Models and Interpretations. Hand Book on Data Envelopment Analysis. New York : Kluwer Academic Publishers, 2004. 587 p.

221. Bowlin W.F., Charnes A., Cooper W.W., Sherman H.D. Data Envelopment Analysis and Regression Approaches to Efficiency Estimation and Evaluation. *Annals of Operations Research*. 1985. Vol. 2. Pp. 113–138.

222. Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Application. Boston : Kluwer Academic Publishers, 1994. 513 p.

223. Cooper W.W., Seiford L.M., Tone K. Data Envelopment Analysis: A

Comprehensive Text with Models, Applications, References, and DEA-Solver Software. Boston : Kluwer Academic Publishers, 2000. 318 p.

224. Моргунова О.Н. Методы и алгоритмы исследования эффективности сложных иерархических систем. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.01. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева. 2006. 20с.

225. Жуковский И. В., Гедранович А. Б. Межстрановый анализ эффективности инновационной деятельности на основе метода оболочечного анализа данных среди государств с развитой и развивающейся экономиками, включая Республику Беларусь. *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 2. С. 154-164.

226. DEA Frontier Software. Joe Zhu Foisie School of Business. <http://www.deafrontier.net/index.html> (дата звернення: 17.07.2019).

227. Моргунов Е.П., Моргунова О.Н. Многомерная классификация сложных объектов на основе оценки их эффективности. *Вестник НИИ СУВПТ*. 2003. Вып. 14. С. 222–240.

228. Сахно Є.Ю., Скітер І.С., Двоєглазова М.В. Формування узагальненої моделі інтеграції інформаційних систем підприємства та проекту. *Управління розвитком складних систем*. 2013. № 14. С. 116- 121.

229. Кузьмин А.М. Бенчмаркинг. *Методы менеджмента качества*. 2007. № 2. С. 71-73.

230. Andersen P., Petersen N.C. A procedure for ranking efficient units in Data Envelopment Analysis. *Management Science*. 1993. Vol. 39. pp. 1261-1264.

231. Sowlati T., Paradi J.C. Establishing the “practical frontier” in data envelopment analysis. *Omega*. 2004. Vol.32, Issue 4. pp. 261-272.

232. Sowlati T., Paradi J.C., Suld C. Information systems project prioritization using data envelopment analysis. *Mathematical and Computer Modelling*. 2005. Vol. 41, Issue 11-12. pp.1279-1298.

233. Моргунов Е.П., Моргунова О.Н. Формирование искусственной границы эффективности в методе Data Envelopment Analysis. *Вестник СибГАУ им. М.Ф. Решетнева*. 2003. С. 385–386.

234. Глотов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. Москва : Наука, 1984. 94 с.

235. Ройзензон Г.В. Интерактивные методы снижения размерности признакового пространства в задачах многокритериального принятия решений. Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.10. Москва : Ин-т сист. анализа РАН, 2008. 24 с.

236. Ларичев О.И. Вербальный анализ решений. Москва : Наука, 2006. 181 с.

237. Ройзензон Г.В. Способы снижения размерности признакового пространства для описания сложных систем в задачах принятия решения. *Новости искусственного интеллекта*. 2005. №1 С. 18-28.

238. Петровский А.Б., Ройзензон Г.В. Интерактивная процедура снижения размерности признакового пространства в задачах многокритериальной классификации. *Труды ИСА РАН*. 2008. Т.35. С. 43-53.

239. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання зовнішні мережі та споруди основні положення проектування. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 180 с.

240. Неня В.Г. Забезпечення закону регулювання параметрів насосної станції за допомогою дроселюючих елементів. *Вісник НТУ "ХПІ". Темат. вип. Нові рішення в сучасних технологіях*. 2011. № 53. С. 128-133.

241. Залуцкий Э.В. Критерии рационального использования энергии в насосных станциях. *Сантехника*. 2003. № 6. С. 34-35.

242. Селепина Р.О., Якимчук Н.М. Алгоритм регулювання енергоефективними режимами роботи насосного обладнання на основі дворівневого прогнозу водоспоживання. *Вісник НУ "Львівська політехніка". Електроенергетичні та електромеханічні системи*. 2010. № 666. С. 92-97.

243. Давиденко В.А. Структуризація сукупності показників рівня ефективності енерговикористання в системах водопостачання та водовідведення. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2010. Випуск 102 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С. 38-40.

244. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. Москва : Статистика, 1980. 182 с.

245. Доманов В.И., Билалова А.И. Прогнозирование объемов энергопотребления в зависимости от исходной информации. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2016. Т. 16, № 2. С. 59–65.

246. Василенко С.Л. Оценочные показатели энергоэффективности систем

централизованного водоснабжения. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. 2015. № 3. С. 89-94.

247. Давиденко Н.В. Формування кортежу визначальних змінних базового рівня електроспоживання насосної станції водопостачання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2017. Вип. 187 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С. 23-25.

248. Шашков В.Б. Обработка экспериментальных данных и построение эмпирических формул. Оренбург : ГОУ ОГУ, 2005. 150 с.

249. Никифоров Г. В. Анализ устойчивости регрессионных моделей электропотребления. *Промышленная энергетика*. 1999. №12. С. 18-20.

250. Абдурахманов А.М., Володин М.В., Зыбин Е.Ю., Рябченко В.Н. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор). *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. 2016. Т.3, №1. С. 3-23.

251. Ahmad A.S., Hassan M.Y., Abdullah M.P., Rahman H.A., Hussin F., Abdullah H., Saidur R. A review on applications of ANN and SVM for building electrical energy consumption forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 33. pp. 102-109.

252. Yu-Rong Zeng, Yi Zeng, Beomjin Choi, Lin Wang Multifactor-influenced energy consumption forecasting using enhanced back-propagation neural network. *Energy*. 2017. Vol. 127. pp. 381-396.

253. Комякова О.А. Возможности искусственных нейронных сетей как аппарата для прогнозирования расхода электрической энергии на предприятиях железнодорожного транспорта. *Омский научный вестник*. 2013. № 2 (120). С. 264-266.

254. Воронов И.В., Политов Е.А. Создание прогнозной модели электропотребления предприятия химической отрасли на основе искусственных нейронных сетей. *Промышленная Энергетика*. 2011. №3. С. 26-29.

255. Абрамович Б.Н., Бабанова И.С. Система прогнозирования энергопотребления с применением искусственной нейронной сети. *Горные науки и технологии*. 2016. № 2. С. 66-76.

256. Черненко П.О., Мартинюк О.В., Попов С.В., Бодянский Є.В. Порівняльний аналіз двох підходів до вирішення задачі короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження електроенергетичної системи. *Технічна*

електродинаміка. 2013. № 3. С.61-72.

257. Петрова К.Г., Серебренников Б.С. Нормування питомих витрат електричної енергії у промисловості з використанням нейро-нечіткого моделювання. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. Вип. 3. С. 84-91.

258. Бабенко А.В., Бодянский Е.В., Попов С.В., Слипченко Е.В. Прогнозирующе-диагностирующая рекуррентная нейро-фаззи сеть в задаче контроля потребления электроэнергии. *Системы обработки інформації*. 2009. № 3(77). С. 2-5.

259. Бодянский Е.В., Попов С.В., Рыбальченко Т.В., Титов Н.Н. Краткосрочное прогнозирование потребления электроэнергии на основе искусственной многослойной нейро-фаззи сети. *Енергетика та Електрифікація*. №9. 2008. С. 37-43.

260. Skakalina O.V. Applied aspects of utilization of the group method of data handling for short-term forecasting. *Науковий вісник НГУ*. 2015. № 6. С. 80-88.

261. Борукаев З.Х. К вопросу о создании комплексной системы прогнозирования электрической нагрузки. *Зб.наук.праць: Інститут проблем моделювання в енергетиці/ІПМЕ НАН України*. 2006. Вип.№33. С. 69–76.

262. Тесленко Н. О. Еволюційна каскадна радіально-базисна нейронна мережа на основі багатовимірних ядер Єпанечникова. *Наукові праці*. 2010. Вип. 130. Т. 143. С. 77-80.

263. Михеев С.В., Михайлов Д.А., Богданова И.Г. Исследование интенсивности транспортных потоков в интеллектуальной ГИС “ITSGIS”. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2014. т. 16. №4(2). С. 393-398.

264. Ивахненко А.Г., Ивахненко Г.А. Обзор задач, решаемых по алгоритмам Метода Группового Учета Аргументов (МГУА) *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1995. vol.5. no.4. pp.527-535.

265. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования. Київ: Наукова думка, 1985. 215 с.

266. Madala. H.R., Ivakhnenko A.G. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling. London - Tokio : CRC Press, 1994. 386 p.

267. Anastasakis L., Mort N., The development of self-organization techniques in modelling: A review of the Group Method of Data Handling (GMDH), *The University of Sheffield, United Kingdom, Research Report no. 813, 2001. URL: https://gmdhsoftware.com/GMDH_%20Anastasakis_and_Mort_2001.pdf*. (дата звер-

нення: 17.12.2019).

268. Степашко В.С. Достижения и перспективы индуктивного моделирования. *Управляющие системы и машины*. 2017. № 2. С. 58-73.

269. Мороз О.Г., Степашко В.С. Огляд гібридних структур МГУА-подібних нейронних мереж та генетичних алгоритмів. *Індуктивне моделювання складних систем*. 2015. Вип. 7. С. 173-191.

270. Ghanadzadeh H, Ganji M., Fallahi S. Mathematical model of liquid–liquid equilibrium for a ternary system using the GMDH-type neural network and genetic algorithm. *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 36. №9. pp. 4096–4105.

271. Fernández F.H., Lozano F.H. GMDH algorithm implemented in the intelligent identification of a bioprocess. *ABCM Symposium Series in Mechatronics*. – 2010. Vol. 4. pp. 278-287.

272. Мантула Е.В., Машталир С.В. Адаптивная полиномиальная нейросетевая прогнозирующая модель временных рядов и ее обучение. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 2/4 (68). С. 16–20.

273. Witczak M., Korbicz J., Mrugalski M., Patton R. J. A GMDH neural network-based approach to robust faultdiagnosis: Application to the DAMADICS benchmark problem. *Control Engineering Practice*. 2006. № 14. pp. 671–683.

274. Madandoust R., Ghavidel R., Nariman-zadeh N. Evolutionary design of generalized GMDH-type neural network for prediction of concrete compressive strength using UPV. *Computational Materials Science*. 2010. Vol. 49. Issue 3. pp. 556-567.

275. Rezaei M.H., Sadeghzadeh M., Nazari M.A., Ahmadi M.H., Astaraci F.R. Applying GMDH artificial neural network in modeling CO₂ emissions in four nordic countries. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 2018 Vol. 13. Issue 3. pp. 266–271.

276. Ahmadi M.H., Ahmadi M.A., Mehrpooya M, et al. Using GMDH neural networks to model the power and torque of a stirling engine. *Sustain*. 2015. vol.7. pp. 2243–2255.

277. Jacob T., Usman A.U., Bemdoo S., Susan A.A. Short- term electrical energy consumption forecasting using GMDH - type neural network. *Journal of Electrical and Electronic Engineering*. 2015. Vol. 3. No. 3. pp. 42-47.

278. Srinivasan D. Energy demand prediction using GMDH networks.

Neurocomputing. 2008. Vol. 72. Issue 1-3. pp. 625-629.

279. De Giorgi M. G., Malvoni M., Congedo P. M. Comparison of strategies for multi-step ahead photovoltaic power forecasting models based on hybrid group method of data handling networks and least square support vector machine. *Energy*. 2016. Vol. 107. No.15. pp. 360-373.

280. Павлов А.В., Кондрашова Н.В. О сходимости обобщенного релаксационного итерационного алгоритма метода группового учета аргументов. *Управляющие системы и машины*. 2012. № 3. С. 24-38.

281. Стеценко І.В. Моделювання систем. Черкаси : ЧДТУ, 2010. 399 с.

282. GMDH Shell – Forecasting Software for Professionals. URL: <http://www.gmdhshell.com> (дата звернення: 17.11.2019).

283. GMDH Shell for Data Science. The Best Artificial Neural Network Solution of 2019: Raise Forecast Accuracy with Powerful Neural Network Software. URL: <https://gmdhsoftware.com/neural-network-software> (дата звернення: 17.11.2019).

284. GMDH Shell for Data Science. GMDH Shell Documentation. URL: <https://gmdhsoftware.com/docs/> (дата звернення: 17.11.2019).

285. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О. Вибір необхідного складу критеріїв адекватності математичних моделей енергоспоживання в системах оперативного контролю енергоефективності. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. № 3. С. 68-77.

286. Одейчук А.Н. Обобщенный критерий эффективности моделей прогнозирования временных рядов в информационных системах. *Вісник Академії митної служби України. Серія Технічні науки*. 2009. № 2. С. 44-54.

287. Волошко А.В., Бедерак Я.С., Лутчин Т.М. Проблеми вибору оптимальної математичної моделі енергоспоживання на промислових підприємствах. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. № 5/8 (65). С. 19-23.

288. Карамбиров С.Н. Многорежимная оптимизация систем подачи и распределения воды. *Проблемы научного обеспечения развития эколого-экономического потенциала России*. Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции (15-19.03.2004). Москва, 2004. С.70-73. URL: <http://ieek.timacad.ru/science/ht/10/2004/sb-04.htm> (дата звернення: 17.09.2019)

289. Вуколов Э.А. Основы статистического анализа. Практикум по статисти-

ческим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL. Москва : ФОРУМ, 2008. 464 с.

290. Коменда Т.І., Коменда Н.В. Морфометричні методи і моделі оцінки та зменшення нерівномірності навантажень систем електропостачання : монографія. Луцьк: Луцький НТУ, 2012. 112 с.

291. Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.

292. Сарычева Л.В. Объективный кластерный анализ данных на основе МГУА. *Проблемы управления и информатики*. 2008. № 2. С. 86–104.

293. Ивахненко А. Г. Объективная кластеризация на основе теории самоорганизации моделей. *Автоматика*. 1987. № 5. С. 6–15.

294. Ивахненко А.Г. Алгоритмы метода группового учета аргументов (МГУА) при непрерывных и бинарных признаках. Препр. Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова. Київ, 1992. 49 с.

295. Кондрашова Н.В., В.А. Павлов, А.В. Павлов Решение задачи медицинской диагностики с применением линейного дискриминантного анализа и МГУА. *УСiМ*. 2013. № 2, С. 79-88.

296. Осипенко В.В. Два підходи до розв'язання задачі кластеризації у широкому сенсі з позицій індуктивного моделювання. *Енергетика і автоматика*. 2014. №1. С. 83-97.

297. Сарычев А.П. Итерационный алгоритм МГУА для синтеза разделяющей функции в задаче дискриминантного анализа. *Автоматика*. 1988. № 2. С. 20–24.

298. Сарычев А.П. Решение задачи дискриминантного анализа в условиях структурной неопределенности на основании МГУА. *Проблемы управления и информатики*. 2008. № 3. С. 100–112.

299. Сарычев А.П. Идентификация состояний структурно-неопределенных систем. Днепропетровск : Институт технической механики НАН Украины и НКА Украины, 2008. 268 с.

300. Sarychev A.P., Sarycheva L.V. GMDH-Based Criterion for Optimal Set Features Determination in Nonlinear Discriminant Analysis. *Inductive Modeling. Proc. of 3d intern. conf. ICIM'2010. Yevpatoria*, 2010. P. 40-43.

301. Кондрашова Н. В., Павлов Ал. В., Павлов Ан. В., Павлов В. А. Адаптив-

ная система классификаторов МГУА. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2014. №3/2(3). С. 68-73.

302. Tax D.M.J., Duin R.P.W. Using two-class classifiers for multiclass classification. *16th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. 2002. Vol. 2. pp. 124–127.

303. Карасиков М.Е., Максимов Ю.В. Поиск эффективных методов снижения размерности при решении задач многоклассовой классификации путем её сведения к решению бинарных задач. *Машинное обучение и анализ данных*. 2014. Т. 1. №9. С. 1273-1290.

304. ГОСТ Р 50779.22-2005 Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего (ISO 2602:1980). Москва : Стандартинформ, 2005. 11 с.

305. Синеглазов В.М., Чумаченко Е.И., Горбатюк В.С. Метод решения задачи прогнозирования на основе комплексирования оценок. *Індуктивне моделювання складних систем*. 2012. Вип. 4. С. 214-223.

306. Кондрашова Н.В., Павлов Я.В. Сравнительный анализ методов сглаживания и МГУА для прогнозирования временных рядов. *Індуктивне моделювання складних систем*. 2009. Вип.1. С. 84-101.

307. Калиничева Р.В., Чекмаковский П.П. Теоретические аспекты контроля. *Збірник наукових праць Таврійського державного агротехнологічного університету (економічні науки)*. 2013. №2(4)(22). С. 117-129.

308. Harris P. Energy monitoring and target setting using CUSUM. Cheriton Technology Publications. 1989. 106 p.

309. Radu Godina, Carina Pimentel, F.J.G. Silva, João C.O. Matias. Improvement of the Statistical Process Control Certainty in an Automotive Manufacturing Unit. *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 17. pp. 729–736.

310. Гаглыева И.Э., Добаев А.З., Дедегкаева А.А. Разработка математической модели комплексной оценки состояния электроэнергетических объектов. *Електронний науковий журнал «Інженерний вестник Дона»*. 2013. №3. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013> (дата звернення: 17.11.2019).

311. Gejdoš P. Continuous Quality Improvement by Statistical Process Control. *Procedia Economics and Finance*. 2015. Vol.34. pp. 565 – 572.

312. Montgomery D.C. Introduction to statistical quality control. New York : John Wiley and Sons, 2009. 754 p.

313. ДСТУ ISO/TR 10017:2005 Настанови щодо застосування статистичних методів згідно з ISO 9001:2000 (ISO/TR 10017:2003, IDT) Київ : ДП "НДІ "Система", 2007.

314. ДСТУ ISO 22514-1:2016 Статистичні методи керування процесом. Потужність і функціонування. Частина 1. Загальні принципи і концепції (ISO 22514-1:2014, IDT). Київ, 2016. 31 с.

315. Находов В.Ф., Бориченко О.В., Іванько Д.О., Пецкова О.О., Пецков Р.О. Методичні основи моніторингу результатів впровадження заходів з енергозбереження. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. № 8. С. 8-19.

316. Bonfá F., Benedetti M., Ubertini S., Introna V., Santolamazza A. New efficiency opportunities arising from intelligent real time control tools applications: the case of Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use. *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. pp. 4198-4203.

317. ISO 7870-4:2011 Control charts - Part 4: Cumulative Sum Charts. Switzerland, 2011. 63p.

318. Находов В.Ф. Управління режимами споживання та ефективністю використання електричної енергії в енергетичних системах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.01. Київ: НТУУ КПІ, 2018. 52 с.

319. Вальд А. Последовательный анализ. Пер. с англ. Под ред. Б.А.Севастьянова. Москва : Физматиздат, 1960. 328 с.

320. Ширяев А.Н. Минимаксная оптимальность метода кумулятивных сумм в случае непрерывного времени. *УМН*. 1996. Т. 310. №4. С. 173–174.

321. Клячкин В.Н. Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. Москва: Физматлит, 2011. 195 с.

322. ISO 7870-2:2013 Control charts - Part 2: Shewhart control charts. Switzerland, 2013. 44p.

323. Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А. Диагностика состояния объекта по наличию неслучайных структур на контрольной карте. *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2013. № 5. С. 44–50.

324. Бодяньський Є.В., Михальов О.І., Плісс І.П. Адаптивне виявлення роз-

ладнань в об'єктах керування за допомогою штучних нейронних мереж. Дніпропетровськ : Системні технології, 2000. 140 с.

325. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Э., Лук'яненко Ю.В. Основы теории планирования эксперимента. Вінниця: ВНТУ, 2006. 167 с.

326. Клячкин В.Н., Константинова Е.И. Контроль многопараметрического технологического процесса в условиях нарушения нормальности распределения. *Автоматизация и современные технологии*. 2007. №7. С. 3–6.

327. ДСТУ ISO 7873:2004 Статистичний контроль. Контрольні карти для арифметичного середнього з попереджувальними межами (ISO 7873:1993, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 14 с.

328. Клячкин В.Н. Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии. Москва : Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2009. 304 с.

329. Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А., Святова Т.И. Методы повышения эффективности многомерного статистического контроля. *Наукоемкие технологии*. 2013. Т. 14, № 5. С. 53–58.

330. Агеев М.К. Энергоменеджмент и контроль выполнения энергосберегающих программ – гарантия успеха. *ЭСКО. Энергетика и промышленность*. 2014. №2. URL: http://journal.esco.co.ua/industry/2014_2/art294.html (дата звернення: 15.12.2019).

331. Руководство по алармам и событиям в InTouch® HMI. Wonderware Russia (ZAO Klinkmann Spb). 512 с. URL: http://old.intouch.ru/support/pub/ITAlarmsAndEvents_ru_10_300408.pdf (дата звернення: 15.12.2019).

332. ТОВ «Розклад Погоди». Архів погоди в Луцьку. https://rp5.ua/Архів_погоди_в_Луцьку (дата звернення: 17.11.2019)

333. Марченко Б.Г., Щербак Л.М. Основы теории вимірювань. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Електроенергетика*. 1999. С. 221-230.

334. Белов В.С. Информационно-аналитические системы. Основы проектирования и применения. Москва : Московский государственный университет экономики, статистики и информатики, 2005. 111 с.

335. Плескач В.Л., Затонацька Т.Г. Інформаційні системи і технології на підприємствах. Київ : Знання, 2011. 718 с.

336. Медиковський М., Цмоць І., Подольський М. Обґрунтування принципів побудови та розроблення узагальненої архітектури інформаційно-аналітичної системи для оцінювання, прогнозування та управління енергоефективністю економіки регіону. *Вісник НУ "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2013. № 751. С. 40–51.

337. Борукаев З.Х., Остапченко К.Б., Лисовиченко О.И. Концепция построения информационно-технологической платформы проектирования систем поддержки принятия решений для организационного управления энергорынком. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2018. №1 (32). С. 3–14.

338. ДСТУ 2481-94. Системи оброблення інформації. Інтелектуальні інформаційні технології. Терміни та визначення. Київ : Держстандарт України, 1994. 72 с.

339. Борукаев З.Х., Остапченко К.Б., Грицюк Л.И. Компьютерная модель мониторинга энергоэффективности: аспекты информационного моделирования. *Енергетика та електрифікація*. 2007. № 1. С. 3-7.

340. Борукаев З.Х., Остапченко К.Б., Грицюк Л.И. Построение информационной модели системы мониторинга энергоэффективности. *Енергетика та електрифікація*. 2007. №2. С. 60 – 65.

341. Евдокимов В.Ф., Борукаев З.Х., Остапченко К.Б. Компьютерная модель мониторинга энергоэффективности: информационно-технологические аспекты. *Енергетика та електрифікація*. 2006. №11. С. 52 - 57.

342. Гуринович А.Д., Бахмат А.Б. Экономика предприятий. Минск: БНТУ, 2012. URL: <http://www.bntu.by/sf-es.html> (дата звернення: 15.06.2019).

343. Розен В.П., Давиденко В.А. Відбір чинників впливу на рівень ефективності електроспоживання систем водопостачання. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2009. Вип. №5 (58). С. 35-39.

344. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2004. 240 с.

345. Борукаев З.Х., Евдокимов В.Ф., Остапченко К.Б., Шатров В.Ф. Теоретические и информационные аспекты создания компьютерной системы управления топливно-энергетическим комплексом. *Электронное моделирование*. 2002. том 24. № 1. С. 59–70.

346. Теслюк Т., Цмоць І., Опотяк Ю., Теслюк В. Архітектура багаторівневої системи управління енергоефективністю регіону. *Вісник НУ "Львівська політехніка". Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. 2017. № 864. С. 201-209.

347. Андрианов Д.Л., Балаш М.Н., Савиных М.В. Информационно-аналитическая система как основа эффективной поддержки принятия решений в энергоменеджменте российских промышленных предприятий химической отрасли. *Энергосбережение и Водоподготовка*. 2012. № 5 (79). С. 28-22.

348. Гаглыева И.Э. Алгоритм функционирования интеллектуальной системы поддержки принятия решений для оценки технического состояния и эффективности процесса обновления и модернизации производственных фондов электроэнергетических объектов. *Науковедение*. 2013. №3 (16). URL: <http://naukovedenie.ru/> (дата звернення: 15.10.2019).

349. Jouko E. Pakanen, Veli J. Möttönen, Mikko J. Hyytinen, Heikki A. Ruonansuu, Kaija K. Törmäkangas. A Web-Based Information System For Diagnosing, Servicing And Operating Heating Systems. *The Journal of Information Technology in Construction*. 2001. Vol. 6 Pp. 45–56.

350. Богатырев В.Е., Четвергова М.В. Проблемно-ориентированная система мониторинга с использованием технологии виртуальной реальности. *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 2. URL: www.science-education.ru/102-5637 (дата звернення: 15.10.2019).

351. Wernstedt F., Davidsson P. An Agent-Based Approach to Monitoring and Control of District Heating Systems. *15th international conference on Industrial and engineering applications of artificial intelligence and expert systems: developments in applied artificial intelligence*. Proceedings. 2002. P. 801–811.

352. Peulic A., Dragicevic S., Snezana M., Jovanovic Z., Krneta R. Flexible GPS/GPRS based System for Parameters Monitoring in the District Heating System. *International Journal of Computers Communications & Control*. 2013. Vol. 8. No. 1. pp.105–110.

353. Финогеев А.Г., Богатырев В.Е, Маслов В.А., Финогеев А.А. Мониторинг и поддержка принятия решений в системегородского теплоснабжения на базе гетерогенной беспроводной сети. *Известия ВолгГТУ*. 2011. № 3 (76). С. 83–93.

354. Гринчак М.В., Шаповалов А.Л., Кузьмичова К.В. Пристрої бездротової

передачі даних для обліку витрат енергоресурсів об'єктів комунального господарства. *Комунальне господарство міст*. 2011. № 101. С. 449–456.

355. Шендрик В.В., Ващенко С.М. Система збирання, розміщення та аналізу даних. *Вісник НУ "Львівська політехніка"*. 2011. № 715. С. 1-11.

356. Актуальні проблеми формування та розвитку європейського інформаційного простору : монографія. За заг. ред. Є.Б. Тихомирової. Луцьк : Вид-во ВМА "Терен", 2012. 354 с.

357. Цмоць І.Г., Роман В.І. Вдосконалення методу групування енергетичних даних у системі багаторівневого управління енергоефективністю економіки регіону. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. т. 29. № 1. С. 116-120.

Додаток А

Документи, що підтверджують практичну значимість результатів дисертаційної роботи



УКРАЇНА
Міністерство освіти і науки України
Державний департамент інтелектуальної власності

СВІДОЦТВО

про реєстрацію авторського права на твір

№ 37831

Технічний твір "Методика оцінювання рівня ефективності
 енерговикористання на об'єктах підприємства комунального
 водопостачання та водовідведення"

(вид, назва твору)

Автор(и) Розен Віктор Петрович, Давиденко Людмила Валеріївна, Давиденко
 Володимир Анатолійович

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

08.04.2011

Дата реєстрації

Голова Державного департаменту
 інтелектуальної власності



М.В.Паладій

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 83989

Науковий твір "Процедура формалізації циклічних змін водоподачі насосних станцій комунального водопостачання"

(вид, назва твору)

Автор(и) Розен Віктор Петрович, Давиденко Людмила Валеріївна, Давиденко Ніна Володимирівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 26.12.2018

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев



УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 85617

Науковий твір "Процедура побудови базового рівня електроспоживання насосної станції водопостачання"

(вид, назва твору)

Автор(и) Розен Віктор Петрович, Давиденко Людмила Валеріївна, Давиденко Ніна Володимирівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 11.02.2019

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев



ДК-Україна. Вер. 9-2014. 2014 р. 1-14.

УКРАЇНА



СВІДОЦТВО
про реєстрацію авторського права на твір

№ 88363

Науковий твір "Методика контролю ефективності електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників"

(вид, назва твору)

Автор(и) Розен Віктор Петрович, Давиденко Людмила Валеріївна, Давиденко Ніна Володимирівна

(повне ім'я, псевдонім (за наявності))

Дата реєстрації 08.05.2019

Державний секретар Міністерства економічного розвитку і торгівлі України О. Ю. Перевезенцев





УКРАЇНА
Луцька міська рада

КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО "ЛУЦЬКВОДОКАНАЛ"

Адреса: 43010, м. Луцьк, вул. Дубнівська, 26.

Телефони: 28-40-00, факс 28-40-10, E-mail: info@vjd.lutsk.ua

Р/р 260063654801 ПАТ «Банк інвестицій та заощаджень» м. Луцьк МФО 380281 ЗКПО 03339489

№ _____

На № _____

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
доцента кафедри електропостачання Луцького НТУ
Давиденко Людмила Валеріївни

Цим актом засвідчуємо, що результати досліджень, виконаних Давиденко Л.В. за темою дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, впроваджені на підприємстві водопровідно-каналізаційного господарства КП «Луцькводоканал» для підвищення енергоефективності системи комунального водопостачання м. Луцьк та під час організації системи енергетичного менеджменту підприємства, а саме:

- методику експрес оцінки рівня енергоефективності об'єктів водопостачання, використано для визначення рівня енергоефективності водозаборів та системи водопостачання, виявлення причин низького (недостатньо високого) рівня енергоефективності та прийняття рішень щодо першочерговості заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності;

- запропонований підхід до ідентифікації впливу на витрату воду з мережі водопостачання циклічних і сезонних змін стану зовнішнього середовища та соціальних чинників, а також принципи опису режиму водоподачі з урахуванням сезону та типу дня враховано під час планування режиму водоподачі, зокрема, для корегування графіків ввімкнення/вимкнення насосних агрегатів насосної станції II підйому, що забезпечує можливість зниження витрат електроенергії на подачу води в мережу водопостачання;

- запропоновані процедури планування електроспоживання та контролю його ефективності з урахуванням ієрархічного рівня об'єкту водопостачання впроваджено як складові системи енергетичного менеджменту підприємства. Зокрема, алгоритм контролю ефективності електроспоживання, який передбачає комплексний контроль відповідності фактичних значень контрольованих параметрів (електроспоживання, технологічних параметрів процесу водоподачі, питомого електроспоживання) їх запланованим значенням, використано як інструмент виявлення моментів перевитрати електроенергії, причин, які зумовили ці перевитрати, фактів неефективної організації технологічного процесу водоподачі, тенденцій до підвищення (погіршення) рівня ефективності електроспоживання в системі водопостачання та її об'єктах, та прийняття рішення щодо необхідності корегування режиму водоподачі з урахуванням впливу кліматичних чинників.

Очікується, що впровадження вказаних результатів забезпечить зменшення споживання електроенергії на подачу води в мережу водопостачання на 6-8 %, а зменшення витрат коштів на оплату за спожиту електроенергію становитиме 200-250 тис. грн. за рік.

Перший заступник директора

С.С. Дмитрош

Головний інженер

С.Б. Строк

Головний енергетик

В.А. Неспай





ТЕРНОПІЛЬСЬКА МІСЬКА РАДА
КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО
“ТЕРНОПІЛЬВОДОКАНАЛ”

46008 м. Тернопіль, вул. Танцюрова, 7 тел./факс: 0 (352) 52-52-20
 e-mail: info@vodokanal.te.ua web: <http://www.vodokanal.te.ua>

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
 доцента кафедри електропостачання Луцького НТУ
Давиденко Людмили Валеріївни

Цим актом засвідчуємо, що результати дисертаційного дослідження Давиденко Л.В. прийняті до впровадження на комунальному підприємстві «Тернопільводоканал» під час планування режиму роботи насосних станцій другого підйому системи комунального водопостачання м. Тернопіль та контролю його енергоефективності, а саме:

- методику ідентифікації циклічних змін режиму водоподачі, зумовлених впливом сезонних та соціальних чинників, а також формалізованого опису добової водоподачі та профіля її добового графіка з урахуванням сезону та типу дня;
- методику контролю ефективності електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників;
- принципи корегування профіля добового графіка водоподачі з урахуванням впливу кліматичних чинників.

Очікується, що ідентифікація циклічних змін режиму водоподачі, зумовлених впливом сезонних та соціальних чинників, дозволить виконати корегування графіків ввімкнення/вимкнення насосних агрегатів насосної станції другого підйому, що сприятиме узгодженню графіків водоспоживання та водоподачі з урахуванням сезону та типу дня та забезпечить зменшення перекачування надлишкових об'ємів води; організація контролю ефективності електроспоживання, яка передбачає також контроль технологічних параметрів процесу водоподачі, дозволить виявляти моменти невідповідності фактичного режиму водоподачі запланованому та приймати рішення щодо необхідності корегування режиму водоподачі.

За попередніми оцінками впровадження вказаних результатів може забезпечити зниження витрат електроенергії, яка споживається на насосних станціях другого підйому підприємства, на 4-5 % та економію коштів на оплату за спожиту електроенергію близько 140-150 тис. грн. за рік.

Директор

Головний інженер

Головний енергетик



В.А. Кузьма

Р.І. Романів

С.М. Якимішин



Енергія

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»

НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
АВТОМАТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «ЕНЕРГІЯ»

НДІ «ЕНЕРГІЯ», КПІ-4110,
проспект Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна Тел/факс: +38 (044) 204-85-21

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Давиденко Людмили Валеріївни,
яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Результати наукових досліджень, які отримані Давиденко Л.В. за темою дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, використовуються НДІ «Енергія» під час виконання робіт з розроблення системи планування та контролю споживання електроенергії промислових підприємств, зокрема:

Найменування впровадженого результату	Форма впровадження результату
Урахування циклічних змін виробничого процесу під час планування електроспоживання виробничих об'єктів різних ієрархічних рівнів	Методики ідентифікації та формалізації циклічних змін виробничого процесу, зумовленого впливом зовнішніх чинників Методики побудови базового рівня електроспоживання та планування електроспоживання з урахуванням циклічних змін виробничого процесу та ієрархічного рівня виробничого об'єкту
Налаштування інструментів сигналізації про перевищення нормативів контрольованих параметрів з урахуванням характеру впливу параметра на електроспоживання та фактичного стану енергоефективності об'єкту	Методики контролю ефективності електроспоживання виробничого об'єкту з урахуванням фактичних умов роботи виробничого об'єкту та виявлення тенденцій до покращення (погіршення) рівня енергоефективності

Директор
НДІ автоматики та енергетики «Енергія»
НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»
канд. техн. наук, доцент,
лауреат Державної премії України



В.П. Калінчик

ДОВІДКА
 про впровадження результатів дисертаційної роботи
Давиденко Людмили Валеріївни

Одним з напрямків наукового дослідження Давиденко Л.В., виконаного за темою дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, є розвиток методології оцінювання рівня енергоефективності складних виробничих систем та їх об'єктів на засадах порівняльного аналізу та розробка механізму бенчмаркінгу енергоефективності, з урахуванням запропонованої в міжнародному та державному стандартах моделі бенчмаркінгу.

Практичний інтерес одержаних в дисертації результатів у зазначеному напрямі представляють:

- процедура проведення бенчмаркінгу, яка передбачає вибір методу оцінювання рівня енергоефективності з урахуванням типу бенчмаркінгу, фактичного рівня енергоефективності об'єкту дослідження, вибраного об'єкту наслідування, що дозволяє виконати позиціонування об'єкту дослідження за рівнем енергоефективності, сформувані досяжні бенчмарки енергоефективності та визначити завдання щодо удосконалення об'єкту;

- процедура експрес оцінки енергоефективності виробничого об'єкту, що базується на методі багатокритерійної порядкової класифікації можливих станів об'єкту за окремими класифікаційними характеристиками енергоефективності, які агрегуються в складові критерії вищих рівнів, що забезпечує оцінювання рівня енергоефективності об'єкту шляхом самооцінки та визначення шляхів його підвищення.

Зазначені результати дисертаційної роботи Давиденко Л.В. плануються для використання при проведенні науково-дослідницьких робіт інституту в аналізованому спрямуванні досліджень.

Довідка видана для подання до спеціалізованої вченої ради за місцем захисту дисертації.

Директор науково-дослідного
 гірничорудного інституту
 криворізького національного університету
 канд. Техн. наук, професор



Бабець Є.К.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Давиденко Людмили Валеріївни

Наукове дослідження Давиденко Л.В. присвячене проблемі удосконалення та подальшого розвитку методології побудови та функціонування систем моніторингу ефективності електроспоживання складних виробничих систем та їх об'єктів, зокрема, планування електроспоживання та контролю його ефективності з урахування циклічних змін виробничого процесу відповідно до вимог серії стандартів ISO 50000.

Практичний інтерес одержаних в дисертації результатів у зазначеному напрямі представляють:

- підхід до ідентифікації циклічних змін виробничого процесу, яка передбачає виявлення подібності добових графіків визначального чинника технологічного процесу на основі методів інтелектуального аналізу даних, та формалізованого опису цих змін, який передбачає побудову типових профілів добових графіків визначального чинника технологічного процесу для типових умов роботи виробничого об'єкту та можливість їх корегування з урахуванням впливу кліматичних чинників;

- процедура контролю ефективності електроспоживання виробничого об'єкту, яка передбачає контроль електроспоживання, технологічних параметрів та показників енергоефективності, що забезпечує можливість виявлення не лише моментів невідповідності рівня ефективності електроспоживання, а й причин цих змін, в тому числі, зумовлених впливом кліматичних чинників, а також дозволяє виявити наявність/відсутність тенденцій до удосконалення рівня енергоефективності та якісно охарактеризувати ефективність режиму електроспоживання, в тому числі, з урахуванням результатів кращих за рівнем енергоефективності об'єктів.

Зазначені результати дисертаційної роботи Давиденко Л.В. використовуються в інституті «Кривбаспроект» під час виконання робіт по проектуванню та впровадженню автоматизованого робочого місця енергоменеджера гірничо-металургійних підприємств України

Директор



Перегудов В.В.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Ректор

Луцького національного
технічного університету
д.т.н., професор

П.П. Савчук

**АКТ****впровадження результатів дисертаційної роботи***Давиденко Людмили Валеріївни*

**«Наукові основи комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів
водопровідного господарства»
у навчальний процес**

Члени комісії у складі декана факультету екології, туризму та електроінженерії, к.т.н., доцента Волинця В.І., завідувача кафедри електропостачання, к.т.н., доцента Грицюка Ю.В. та доцента кафедри електропостачання, к.т.н., доцента Коменди Н.В. склали цей акт про те, що у Луцькому національному технічному університеті під час викладання дисципліни «Енергетичний аудит та енергоменеджмент» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» впроваджено такі результати, отримані Давиденко Л.В. під час дисертаційного дослідження:

- аналіз сучасних аспектів забезпечення енергоефективності та інструментів ефективного управління енергоспоживанням, в тому числі, призначення бенчмаркінгу та моніторингу енергоефективності як складових системи енергоменеджменту підприємства;

- принципи планування енергоспоживання та унормування базового рівня енергоспоживання до визначальних змінних, які мають істотний вплив на ефективність енергоспоживання, та урахування фактичних умов функціонування виробничого об'єкту, що визначаються впливом зовнішніх чинників, під час планування витрати енергоресурсів протягом певного проміжку часу;

- принципи організації контролю ефективності електроспоживання, який передбачає одночасний контроль дотримання встановлених нормативів як електроспоживання, так і визначальних змінних, які мають істотний вплив на ефективність електроспоживання, що базується на використанні інструменту статистичного контролю та забезпечує виявлення факту зниження/підвищення ефективності електроспоживання, а також причин, що його зумовили.

Декан ФЕТЕ
к.т.н., доцент

В.І. Волинець

Зав. кафедри електропостачання
к.т.н., доцент

Ю.В. Грицюк

Доцент кафедри електропостачання
к.т.н., доцент

Н.В. Коменда

ДОДАТОК Б

ПОЛЕ АТРИБУТИВ-ХАРАКТЕРИСТИК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВИХІДНОГО СТАНУ
ОБ'ЄКТІВ ВОДОПРОВІДНОГО ГОСПОДАРСТВА

Вихідне інформаційне поле комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання підприємства ВГ містить набір атрибутів-характеристик, що описують умови вихідного стану, ефективність організації технологічного процесу водоподачі та функціонування всієї СКВ (фіксуються сумарні значення характеристик) та кожного її об'єкту і структурного елементу (водозабору, НС, станціях водопідготовки тощо), зокрема:

1) блок характеристики показників виробництва [342] який містить:

- групу натуральних показників (тис.м³), що характеризують виробничу діяльність об'єкту водопостачання (окремі з них стосуються всієї СКВ на рівні підприємства ВГ, або водозаборів): об'єм піднятої води; об'єм очищеної води; об'єм поданої води в мережу водопроводу, в тому числі, поданої населенню, промисловим підприємствам, установам; об'єм витрати води на власні потреби; об'єм витрати води на технологічні потреби; об'єм води, на який виставлено рахунки споживачам, в тому числі, реалізованої населенню, промисловим підприємствам, установам; втрати води в мережі водопостачання; витрати хімічних реагентів кожного виду;

- групу показників, що характеризують об'єм попиту на воду: питоме водоспоживання на одну людину (м³/особу); середньодобові значення об'єму води (тис.м³/добу), визначених з урахуванням натуральних виробничих показників та тривалості періоду спостереження (як правило, один рік): поданої в мережу водопостачання; реалізованої; реалізованої населенню; реалізовано згідно приладів обліку споживачів;

- групу відносних показників, визначених з урахування натуральних виробничих показників по відношенню до фактичних об'ємів поданої в мережу води – питомі показники: витрати води на власні потреби, витрати води на технологічні

потреби, втрати води; витрати хімічних реагентів кожного виду.

2) блок показників електроспоживання: фактичне електроспоживання (загальне на надання послуги з водопостачання; на підйом води; на водопідготовку; на подачу в водопровідну мережу тощо);

3) блок вихідних характеристик технічного стану: проектна та фактична виробнича потужність споруд СКВ та їх структурних елементів: водозабірних споруд, споруд водопідготовки, водопроводу; кількість аварій в мережах водопостачання; протяжність мереж водопроводу та вуличних мереж; довжина реконструйованих мереж водопостачання; довжина аварійних та ветхих мереж водопостачання; кількість НС; кількість НС, обладнання яких потребує заміни; кількість НА НС та їх паспортні дані (номінальна продуктивність, номінальна потужність, ККД) тощо;

4) блок технологічних параметрів структурних елементів СКВ (сформовано з урахуванням рекомендацій [239]): витрата води від кожної водозабірної споруди, тиск в напірному трубопроводі кожної водозабірної споруди, перепад рівнів на сітках водозабірної споруди, які обертаються, що визначає необхідність їх промивання; об'єм води, що перекачується НС (І-го підйому, ІІ-го підйому); ККД НС; кількість годин роботи НА НС; тиск в НА НС; тиск в напірному водоводі кожного НА, витрата води по кожному напірному водоводу, тиск у водопровідній мережі, надлишкові напори в диктуючих точках водопровідної мережі, витрата води у водопровідній мережі (лініях водопровідної мережі); витрата початкової води на станції очищення та підготування води, каламутність початкової води, рівень рН початкової та обробленої води, тиск у повітродувних та компресорних установках станції очищення та підготування води, втрати тиску у фільтрі або контактному освітлювачі, витрата води, що проходить через кожен освітлювач або відстійник, витрата води на промивання, напір промивних насосів станції очищення та підготування води, тощо

5) блок показників, що характеризують ефективність технічного стану систем водопостачання:

- коефіцієнт використання виробничої потужності водозабірних споруд

[342]:

$$K_{\text{водозаб}}^{BBП} = \frac{Q_{\text{факт.водозаб}}}{Q_{\text{вст.водозаб}}} \quad (\text{Б.1})$$

де $Q_{\text{факт.водозаб.}}$, $Q_{\text{вст.водозаб.}}$ - відповідно фактична та встановлена виробнича потужність водозабірних споруд, тис.м³/добу;

- коефіцієнт використання виробничої потужності споруд водопідготовки:

$$K_{\text{водопідг.}}^{BBП} = \frac{Q_{\text{факт.водопідг.}}}{Q_{\text{вст.водопідг.}}} \quad (\text{Б.2})$$

де $Q_{\text{факт.водопідг.}}$, $Q_{\text{вст.водопідг.}}$ - відповідно фактична та встановлена виробнича потужність споруд водопідготовки, тис.м³/добу;

- коефіцієнт використання виробничої потужності водопроводу:

$$K_{\text{водопр.}}^{BBП} = \frac{Q_{\text{факт.водопр.}}}{Q_{\text{вст.водопр.}}} \quad (\text{Б.3})$$

де $Q_{\text{факт.водопр.}}$, $Q_{\text{вст.водопр.}}$ - відповідно фактична та встановлена потужність водопроводу (пропускна здатність), тис.м³/добу;

- коефіцієнт використання виробничих потужностей СКВ:

$$K_{\text{СКВ.}}^{BBП} = \frac{Q_{\text{под}}}{(Q_{\text{вст.водопр.}} + Q_{\text{вст.водопідг.}} + Q_{\text{вст.водозаб.}}) \cdot N} \quad (\text{Б.4})$$

де N – тривалість роботи обладнання, діб; $Q_{\text{под.}}$ - сумарний об'єм води, поданої споживачам за період N , тис.м³/добу;

- коефіцієнт аварій, що характеризує кількість аварій в мережах водопостачання на 1 км мережі [342]:

$$K_{\text{ав}} = \frac{A}{L} \quad (\text{Б.5})$$

де A - кількість аварій в мережах водопостачання; L - загальна протяжність водопровідних мереж, км.

- коефіцієнт зносу мереж:

$$K_{зн.мереж.} = \frac{L_{авар}}{L} \quad (Б.6)$$

де $L_{авар}$ – довжина водопровідних мереж, що знаходяться в аварійному стані, км;

б) блок показників, що характеризують ефективність організації технологічного процесу водопостачання:

- коефіцієнт ефективності використання природного ресурсу (дає комплексну оцінку ефективності водопроводу в умовах економії природних ресурсів):

$$K_{в.р.} = \frac{Q_{реал}}{Q_{підн}} \quad (Б.7)$$

де $Q_{реал.}$ – об'єм реалізованої споживачам води (на яку виставлено рахунки), тис. м³; $Q_{підн.}$ – об'єм піднятої води тис. м³.

У випадку зменшення втрат води $K_{в.р.}$ збільшуватиметься, прямуючи до 1. Але зменшення втрат води вимагає створення систем з високою надійністю за герметичністю, що збільшує витрати на експлуатацію і створення водопроводів;

- коефіцієнт витрат води на власні потреби [18, 30]:

$$K_{вл.потр.} = \frac{Q_{технол.потр} + Q_{комун.-побут.потр}}{Q_{підн.}} \quad (Б.8)$$

де $Q_{технол.потр.}$, $Q_{комун.-побут.потр.}$ – об'єм витрат води відповідно на технологічні та комунально-побутові потреби;

- коефіцієнт втрат води, який забезпечує характеристику втрат в мережі, які виникають через необліковані витрати води та через витоки внаслідок аварій:

$$K_{втр.} = \frac{Q_{втр}}{Q_{под}} \quad (Б.9)$$

де $Q_{втр.}$ – об'єм втрат води в мережі ($Q_{втр.} = Q_{под.} - Q_{реал.}$);

- коефіцієнт ефективності використання продуктивності НА [18, 30], який характеризує завантаження насосного обладнання, яке безпосередньо впливає на величину використання електроенергії та природних ресурсів і дозволяє оцінити відповідність проектних рішень фактичному водоспоживанню (так як невідповід-

ність насосів за продуктивністю зумовлює створення надлишкових тисків, а отже і витрат природного ресурсу):

$$K_{ef.Q} = \frac{Q_{факт}}{\sum_{i=1}^n Q_{ном_i} \cdot T_{факт_i}} \quad (Б.10)$$

де $Q_{факт.}$ – фактичний об'єм води, що перекачується НС (для НС I-го підйому $Q_{факт.} = Q_{підн.}$; для НС II-го підйому $Q_{факт.} = Q_{под.}$); $Q_{ном_i}$ - номінальна продуктивність і-го НА, м³/год.; n – кількість працюючих НА на НС

- коефіцієнт узагальненого завантаження НА НС по продуктивності протягом доби:

$$K_{завант}^{нас.обл.} = \frac{Q_{факт}}{24 \cdot \sum_{i=1}^n Q_{ном_i}} \quad (Б.11)$$

- усереднений час роботи насосного обладнання НС:

$$t_{р.нас.обл.} = \frac{\sum_{i=1}^n T_{факт_i}}{24 \cdot n} \quad (Б.12)$$

7) блок показників ефективності електроспоживання [18, 30]:

- електроємність продукції:

$$E_e = \frac{W}{П}, \quad (Б.13)$$

де W - електроспоживання на виробничі та господарські потреби, кВтгод; $П$ - річний об'єму випущеної продукції в грошовому вираженні;

- питоме електроспоживання в СКВ:

$$w_{СКВ} = \frac{W_{СКВ}}{Q_{реал}} \quad (Б.14)$$

де $Q_{под}$ - фактичний об'єм води, яку подано до споживачів.

- питоме електроспоживання водозабору (на підйом води, водопідготовку,

та подачу води в мережу водопостачання):

$$w_{\text{водозаб.}} = \frac{W_{\text{підн.}} + W_{\text{водопідгот.}} + W_{\text{под.}}}{Q_{\text{под.}}} \quad (\text{Б.15})$$

де $W_{\text{підн.}}$, $W_{\text{водопідгот.}}$, $W_{\text{под.}}$ - електроспоживання відповідно на підйом, підготування та подачу води в мережу, кВтгод;

- питоме електроспоживання НС:

$$w_{\text{НС.}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{ном.}i} \cdot T_{\text{факт.}i}}{Q_{\text{факт}}} \quad (\text{Б.16})$$

або

$$w_{\text{НС.}} = \frac{W_{\text{НС}}}{Q_{\text{факт}}} \quad (\text{Б.17})$$

де $W_{\text{НС}}$ – електроспоживання на НС, кВтгод; $P_{\text{ном.}i}$ - номінальна потужність двигуна i -го насоса, кВтгод.; $T_{\text{факт.}i}$ – фактичний час роботи i -го насоса, год;

- питома витрата електроенергії НА:

$$w_{\text{НА}} = \frac{P_{\text{ном}} \cdot T_{\text{факт}}}{Q_{\text{факт.НА}}}, \quad (\text{Б.18})$$

- номінальний коефіцієнт ефективності використання потужності НА:

$$K_{\text{еф.Р}}^{\text{НА}} = \frac{P_{\text{ном}}}{Q_{\text{ном}}} \quad (\text{Б.19})$$

де $P_{\text{ном}}$ - номінальна потужність двигуна НА;

- фактичний коефіцієнт ефективності використання потужності НА:

$$K_{\text{еф}}^{\text{НА}} = \frac{P_{\text{ном}}}{Q_{\text{факт.НА}}} \quad (\text{Б.20})$$

- номінальний коефіцієнт ефективності використання потужності НА НС:

$$K_{ном.эф.Р}^{НС} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ном_i}}{\sum_{i=1}^n Q_{ном_i}} \quad (Б.21)$$

- фактичний коефіцієнт ефективності використання потужності НА НС:

$$K_{ф.эф.Р}^{НС} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ном_i}}{Q_{факт_{НС}}} \quad (Б.22)$$

- коефіцієнт ефективності використання потужності НС підйому води

$$K_{эф.Р.підйом} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ном_i}^{НС-I}}{Q_{под}} \quad (Б.23)$$

де $P_{ном}^{НС-I}$ - номінальна потужність насосних станції першого підйому

- коефіцієнт ефективності використання потужності приводу НА НС СКВ:

$$K_{эф.Р.СКВ} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{ном_i}^{НС-I} + \sum_{i=1}^n P_{ном_i}^{НС-II}}{Q_{под}} \quad (Б.24)$$

де $P_{ном}^{НС-II}$ - номінальна потужність насосних станції другого підйому;

8) блок показників, що характеризує ефективність організації обліку:

- коефіцієнт забезпеченості споживачів лічильниками води:

$$K_{обл.} = \frac{Q_{реал.прил.обл.}}{Q_{реал}} \quad (Б.25)$$

де $Q_{реал.прил.обл.}$ — об'єм реалізованої споживачам води, на яку виставлено рахунки за показами лічильників, тис. м³.

ДОДАТОК Г

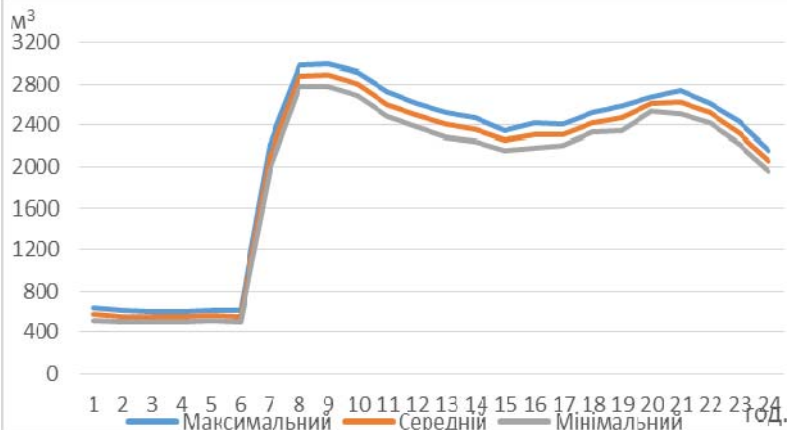
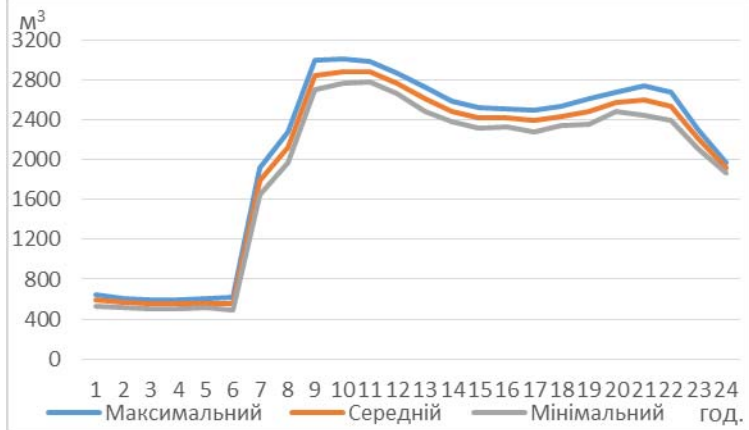
**ФОРМА АНКЕТИ ДЛЯ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ХАРАКТЕРИСТИК ЕНЕРГО-
ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЕРТАМИ ТА ПРИКЛАД ЇЇ ЗАПОВНЕННЯ ТА ПЕР-
ВИННОЇ ОБРОБКИ**

(задача моніторингу: моделювання процесу електроспоживання для визна-
чення БРЕ; об'єкт – СКВ)

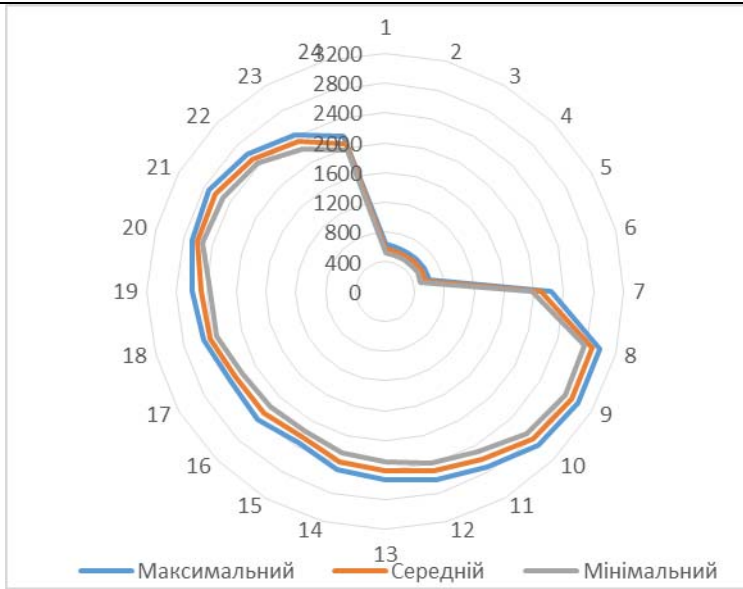
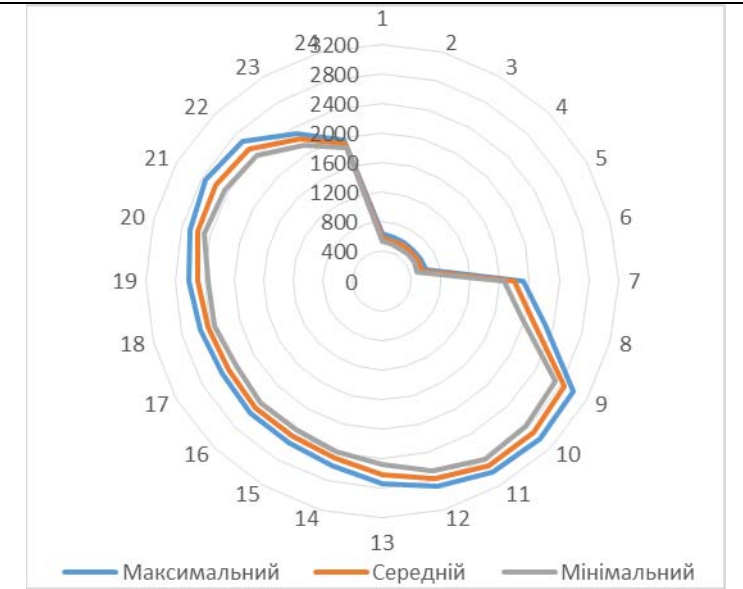
Показники енергоефективності	Оцінка показника за відбірковими ха- рактеристиками			Агрегована оцінка верх- нього рівня	Клас С
	Ступінь впливу	Ступінь ви- мірювання	Ступінь керованості та змінності		
Об'єм піднятої води НС І-го під- йому	0	0	0	000	1
Тиск в напірних трубопроводах водозабірних споруд					
Тиск в НА водозабірних споруд					
Кількість працюючих НА на водо- забірних спорудах					
Номінальна продуктивність НА водозабірних споруд					
Усереднений час роботи НА водо- забірних споруд					
Об'єм очищеної води	2	1	2	212	5
Об'єм поданої води НС ІІ-го під- йому	0	0	0	000	1
Кількість працюючих НА НС ІІ-го підйому					
Номінальна продуктивність НА НС ІІ-го підйому					
Тиск в НА НС ІІ-го підйому					
Тиск в водопровідній мережі	1	0	2	102	3
Усереднений час роботи насосного обладнання НС ІІ-го підйому					
Коефіцієнт корисної дії НС	1	2	1	121	4
Коефіцієнт ефективності викорис- тання продуктивності НА НС	1	1	0	110	2
Коефіцієнт ефективності викорис- тання потужності приводу НА НС	1	1	2	122	4
Витрати води на комунально- побутові потреби	2	2	1	221	5
Витрати води на технологічні пот- реби	0	2	1	021	3
Втрати води в мережі	1	0	1	101	2
...

ДОДАТОК Д
ПРИКЛАД ТИПОВИХ ПРОФІЛІВ ДОБОВИХ ГВВ ТА ЇХ ОПИСУ

Таблиця Д.1 – Типовий профіль добового ГВВ та характеристики добової витрати води

Назва характеристики	Тип дня (для сезону «Зима»)			
	Робочий		Вихідний	
Типовий профіль				
Характеристики добової витрати води	Середнє значення	Межі зміни	Середнє значення	Межі зміни
Добова витрата води, м³	47811	$45583 < \bar{Q} < 50040$	47791	$45421 < \bar{Q} < 50160$
Витрата води у нічний період доби, м³	3350	$3024 < \bar{Q} < 3676$	3370	$3068 < \bar{Q} < 3672$
Витрата води у денний період доби, м³	37982	$36413 < \bar{Q} < 39551$	36370	$34737 < \bar{Q} < 38004$
Витрата води у проміжний період водоспоживання, м³	6478	$6145 < \bar{Q} < 6812$	8049	$7615 < \bar{Q} < 8483$

Таблиця Д.2 – Опис форми типового профілю добового ГВВ

Назва характеристики	Тип дня (для сезону «Зима»)					
	Робочий			Вихідний		
ДРТ						
Морфометричні параметри за профілем	максимальним	середнім	мінімальним	максимальним	середнім	мінімальним
Округлість	0,34	0,33	0,32	0,38	0,36	0,35
Компактність	0,67	0,66	0,63	0,69	0,68	0,66
Видовження	0,53	0,51	0,47	0,54	0,52	0,53
Випуклість	0,87	0,87	0,86	0,89	0,89	0,88
Головна вісь видовження	280,17	279,02	276,59	273,49	269,65	263,79

ДОДАТОК Е
ОПИС ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА МЕТОДІВ КЛАСІВ КОМПЛЕКСНОГО
МОНІТОРИНГУ ОБ'ЄКТІВ ВОДОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВА ВГ

Таблиця Е.1 – Опис властивостей та методів класів

Клас	Властивості класу	Методи класу
Категорія WEB-service		
Class Водоспоживання	Множина даних, що характеризує режим водоспоживання: сезон; дата; тип дня; значення ВВ з мережі водопостачання.	Отримання даних про погодинну ВВ з мережі водопостачання. Формування добових ГВВ. Визначення об'ємів добової ВВ з мережі водопостачання. Передача даних для аналізу добових ГВВ.
Class Кліматичні чинники	Множина даних, що характеризує зовнішнє середовище: сезон; дата; температура; опади.	Отримання даних про значення добової температури, кількості та тривалості опадів. Фіксування дати, типу дня, сезону. Передача даних для аналізу кліматичних показників, планування та контролю водоподачі.
Class Технічні параметри	Множина технічних параметрів: паспортні дані НА; характеристика трубопроводної мережі.	Отримання даних про паспортні дані НА; характеристику трубопроводної мережі. Передача даних для обчислення показників енергоефективності.
Class Технологічні параметри	Множина технологічних параметрів режиму водопостачання: об'єм води, що перекачується НА; напір в диктуючих точках мережі; надлишкові напори в мережі.	Отримання даних про об'єми води, що перекачується НА, напір в диктуючих точках мережі, надлишкові напори в диктуючих точках мережі. Передача даних для організації процедур планування та контролю режиму водоподачі.
Class Електроспоживання	Множина даних, що характеризує електроспоживання.	Отримання даних про електроспоживання. Передача даних для організації процедур планування та контролю режиму електроспоживання.
Категорія FORMS-class		
Class Водоподача Sub-Class Графік	Добовий ГВВ. Показники нерівномірності добового ГВВ. Морфометричні параметри добового ГВВ. Характеристики добової ВВ.	Отримання даних про добовий ГВВ. Обчислення характеристики добової ВВ. Обчислення показників нерівномірності добового ГВВ. Трансформація добового ГВВ в ДРТ. Обчислення морфометричних параметрів. Сукупний аналіз характеристик добового ГВВ. Формування множини подібних добових ГВВ. Передача даних для формалізованого опису водоподачі для типових умов.

Продовження табл. Е.1

Клас	Властивості класу	Методи класу
Class Водоподача Sub-Class Характеристика водоподачі	Добовий ГВВ. Кліматичні показники. Водоподача.	Отримання сімейств добових ГВВ для типових умов роботи. Визначення характеристик добової ВВ для типових умов роботи об'єкту. Формування сімейства типових профілів добових ГВВ. Моделювання добової ВВ з мережі водопостачання для типових умов роботи та профілів її добового ГВВ. Коригування добової ВВ з мережі водопостачання з урахуванням кліматичних чинників. Коригування типових профілів добових ГВВ з урахуванням кліматичних умов. Передача даних для моделювання БРЕ. Передача даних для формування нормативів для характеристик режиму водоподачі та налаштування ІС. Передача даних для планування режиму водоподачі. Передача даних в базу знань.
Class Показники енергоефективності	Технічні та технологічні показники енергоефективності. Питоме електроспоживання.	Отримання даних про режим водоподачі. Обчислення технічних та технологічних ПЕЕ з урахуванням типового профіля добового ГВВ. Передача даних про ПЕЕ для моделювання БРЕ та контролю ефективності електроспоживання. Обчислення питомого електроспоживання. Передача даних для контролю рівня енергоефективності. Передача даних в базу знань.
Class Базовий рівень електроспоживання	Електроспоживання.	Отримання даних про характеристики режим водоподачі та типового профіля добового ГВВ для типових умов роботи об'єкту. Отримання даних про показники енергоефективності. Моделювання електроспоживання з урахуванням типових умов роботи об'єкту. Визначення БРЕ. Передача даних для контролю ефективності електроспоживання. Передача даних в базу знань.
Class Бенчмаркінг енергоефективності	Технічні та технологічні показники енергоефективності.	Отримання даних про технічні та технологічні ПЕЕ. Отримання даних про характеристики виробничої діяльності. Отримання даних про питоме електроспоживання. Рейтингування об'єктів. Передача даних для організації процедур бенчмаркінг-контролю

Продовження табл. Е.1

Клас	Властивості класу	Методи класу
Категорія CONTROL-class		
Class оперативний контроль Sub-Class Контроль водоподачі	Нормативи для технологічних параметрів водоподачі (характеристик режиму). Межі регулювання технологічних параметрів водоподачі. Нормативи для кліматичних показників. Межі регулювання кліматичних показників.	Отримання фактичних значень технологічних параметрів та кліматичних показників. Отримання результатів формалізованого опису водоподачі. Визначення меж регулювання. Налаштування ІС. Організація процедур контролю характеристик водоподачі. Організація процедур контролю кліматичних показників. Організація процедур ідентифікації неефективного режиму роботи об'єкту. Повідомлення енергоменеджера. Передача даних в систему управління режимом водоподачі. Формування звітів. Передача даних в БЗ.
Class оперативний контроль Sub-Class Контроль показників енергоефективності	Нормативи ПЕЕ. Межі регулювання ПЕЕ.	Отримання фактичних значень ПЕЕ. Визначення нормативів ПЕЕ. Визначення меж регулювання. Налаштування ІС. Організація процедур контролю. Організація процедур ідентифікації неефективного режиму роботи. Повідомлення енергоменеджера. Передача даних в СЕМ. Формування звітів. Передача даних в БЗ.
Class оперативний контроль Sub-Class Контроль електроспоживання	БРЕ. Межі регулювання БРЕ.	Отримання значень БРЕ. Отримання фактичних значень електроспоживання. Визначення меж регулювання. Налаштування ІС. Організація процедури контролю. Організація процедур ідентифікації неефективного режиму електроспоживання. Повідомлення енергоменеджера. Передача даних в СЕМ. Формування звітів. Передача даних в БЗ.
Class Бенчмаркінг-контроль Sub-Class Контроль показників енергоефективності	Об'єкт наслідування. Еталонні межі регулювання питомого електроспоживання. Нормативи питомого електроспоживання.	Отримання фактичних значень питомого електроспоживання. Вибір об'єкту наслідування. Визначення еталонних меж регулювання. Налаштування ІС з урахуванням фактичного стану енергоефективності об'єкту. Організація процедури контролю. Організація процедур ідентифікації підвищення (зниження) рівня енергоефективності. Повідомлення енергоменеджера. Передача даних в СЕМ. Формування звітів. Передача даних в БЗ.

Продовження табл. Е.1

Клас	Властивості класу	Методи класу
Class Бенчмаркінг-контроль Sub-Class Контроль електроспоживання	Об'єкт наслідування. Еталонний БРЕ. Еталонні межі регулювання БРЕ.	Отримання фактичних значень електроспоживання. Вибір об'єкту наслідування. Отримання еталонних значень БРЕ. Визначення еталонних меж регулювання. Налаштування ІС з урахуванням фактичного стану енергоефективності об'єкту. Організація процедури контролю. Організація процедур ідентифікації неефективного режиму електроспоживання. Повідомлення енергоменеджера. Передача даних в СЕМ. Формування звітів. Передача даних в БЗ.

ДОДАТОК Ж

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Розен В.П. Моніторинг ефективності енерговикористання в системах комунального водопостачання : монографія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. 148 с.
2. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Формування енергоефективних режимів насосних станцій комунального водопостачання : монографія. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. 104 с.
3. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В., Давиденко В.А. Планування та контроль електроспоживання в системах комунального водопостачання : монографія. Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2020. 160с.

Статті в наукових фахових виданнях України:

4. Давиденко Л.В. Задача багатокритерійного керування електроспоживанням систем водопостачання та водовідведення. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2009. *Технічні науки*. Вип. 86. "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". С. 97-99 .
5. Давиденко Л.В. Формалізація задачі багатокритерійного керування електроспоживанням систем водопостачання та водовідведення. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2010. Вип.101 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». С.19-21.
6. Давиденко Л.В. Формування вихідної сукупності показників рівня енергоефективності об'єктів системи теплопостачання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2014. Випуск 154 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.5-7.
7. Давиденко Л.В. Використання методології бенчмаркінгу для визначення рівня ефективності енергоспоживання в комунальній теплоенергетиці. *Енергосбе-*

режение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. №4. С. 15-20. (РІНЦ)

8. Давиденко Л.В. Принципи побудови інтегрованої системи моніторингу енергоефективності для підприємства водопровідно-каналізаційного господарства. *Енергетика: економіка, технології, екологія.* 2015. № 3 (41). С.107-115. (РІНЦ)

9. Давиденко Л.В. Управлінська функція бенчмаркінгу енергоефективності та його роль в системі енергоменеджменту підприємства. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки.* 2015. Випуск 165 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.6-8.

10. Давиденко Л.В. Інтеграція бенчмаркінгу в систему енергоменеджменту підприємства. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки.* 2016. Випуск 175 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.23-25.

11. Давиденко Л.В. Бенчмаркінг енергоефективності водопровідних господарств: формування групи партнерів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки.* 2018. Випуск 196 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.43-44.

12. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Комплексний підхід до задачі енергозбереження та оцінювання рівня енергоефективності водопостачального підприємства як складної системи. *Відновлювана енергетика.* 2010. №1(20). С. 65-70.

13. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Формування інформаційного поля для оцінювання рівня енергоефективності систем комунального водопостачання. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського.* 2010. Вип. 4/2010 (63), Ч.1. С. 50-53.

14. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Оцінювання рівня енергоефективності об'єктів складних енерготехнологічних систем як задача багатомірного порівняння. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки.* 2011. Випуск 116 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.76-78.

15. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Використання контрольних карт Шухарта для контролювання ефективності електроспоживання в системах комунального водопостачання. *Вісник Кременчуцького національного універси-*

тету ім. М. Остроградського. 2012. Вип.1/2012(72), Ч. 1. С.31-35. (**Ulrich's periodicals directory**)

16. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Інтерпретація контрольних карт Шухарта для визначення рівня ефективності електроспоживання на об'єктах водопостачання. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2012. Вип.4 (75). С.23-28.

17. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Перевірка можливості використання контрольних карт Шухарта для контролювання рівня ефективності електроспоживання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2012. Випуск 130 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.30-32.

18. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Виявлення прихованих взаємозв'язків у вихідній сукупності показників енергоефективності складних виробничих систем. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2013. Вип. 3(80). С.44-49. (**Ulrich's periodicals directory, Index Copernicus, Inspec**)

19. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Оцінювання рівня енергоефективності складних виробничих систем з позицій багатокритерійної класифікації. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2013. Випуск 142 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.6-8.

20. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Моделювання електроспоживання у складних виробничих системах з урахуванням латентних взаємозв'язків у сукупності показників енергоефективності. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2014. Вип. 2(85). С.40-46. (**Ulrich's periodicals directory, Index Copernicus, Inspec**)

21. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Коменда Н.В., Ярмольська Н.В. Функції енергетичного моніторингу складних виробничих систем та їх завдання для підвищення рівня енергоефективності. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2014. Випуск 153 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.125-127.

22. Давиденко Л.В. Давиденко В.А., Коменда Н.В. Використання процедур

статистичного контролю якості для аналізу ефективності електроспоживання в складних виробничих системах. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2015. Випуск 164 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.104-106.

23. Коменда Т.І., Коменда Н.В., Давиденко Л.В. Округлість, компактність та видовження графіків електричного навантаження. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 2. С. 98-105. **(Index Copernicus)**

24. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Побудова інформаційного простору моніторингу ефективності енергоспоживання в системах комунального водопостачання. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація/*. 2016. Вип. 29. С. 178-185.

25. Давиденко Л. В., Давиденко В.А., Коменда Н.В. Багатофакторне моделювання електроспоживання в складних виробничих системах з використанням апарату нейронних мереж. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2016. Випуск 175 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.143-145.

26. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Структура системи комплексного контролю ефективності енергоспоживання об'єктів комунального водопостачання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4 (46). С. 81-88. **(Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PIIЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor)**

27. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Процедура побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 3 (49). С.31-37. **(Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PIIЦ, Джерело,**

URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor)

28. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Коменда Н.В. Принципи налаштування інструментів сигналізації в системі контролю енергоефективності виробничих об'єктів. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2017. Випуск 187 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.18-20.

29. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Процедура планування електроспоживання об'єктів водопостачання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. №6. С.49-54. **(Index Copernicus)**

30. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Урахування циклічних змін процесу водоподачі під час контролю ефективності електроспоживання насосних станцій. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. Вип.2. С. 68-74. **(Index Copernicus, WorldCat, BASE, OpenAIRE, PIIЦ, Джерело, URAN, Open Academic Journal Index (OAJI), Polska Bibliografia Naukowa, Research Bible, International Institute of Organized Research (I2OR), Academic Keys, General Impact Factor, Directory of Research Journals Indexing (DRJI), Scientific Indexing Services, Cosmos Impact Factor, Infobase Index, Real Time Impact Factor)**

31. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Побудова правил дискримінації добових графіків витрати води з мережі водопостачання з урахуванням сезонних та соціальних чинників. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2018. №3/2018(110). С. 20-25. **(Ulrich's Web Global Serials Directory, eLIBRARY", Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor i Scientific Indexing Services)**

32. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Нейромережеве моделювання електро-споживання в системі комунального водопостачання з урахуванням сезонних змін

водоподачі. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2018. Випуск 195 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.78-79.

33. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Моделювання електроспоживання насосної станції водоподачі. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2019. Випуск 1/2019 (114). С. 20-26. (**Ulrich's Web Global Serials Directory, eLIBRARY", Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor i Scientific Indexing Services**)

34. Розен В.П., Давиденко Л.В., Волинець В.І., Давиденко В.А., Давиденко Н.В. Бенчмаркінг енергоефективності електротехнічних комплексів вугільних шахт. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. 2019. Випуск 4/2019 (117). С. 134-140. (**Ulrich's Web Global Serials Directory, eLIBRARY", Index Copernicus, Polish Scholarly Bibliography, Infobase Index, Inspec, Open Academic Journals Index, Google Scholar, CiteFactor i Scientific Indexing Services**)

35. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Моделювання електроспоживання в системі комунального водопостачання методом групового урахування аргументів *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2019. Випуск 203 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.80-81.

36. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Принципи інформаційного забезпечення комплексного моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. Технічні науки*. 2019. Випуск 204 „Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. С.8-10.

Статті у наукових періодичних виданнях іноземних держав:

37. Davydenko L. Indicators System Creation For The Energy Efficiency Benchmarking Of Municipal Power System Facilities. *Problemele energeticii regionale*. 2015. 1 (27). pp. 58-70. (**Web Of Science**)

38. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V., Davydenko N. Formalization of Energy Efficiency Control Procedures of Public Water-Supply Facilities. *Advances in*

Intelligent Systems and Computing. 2017. Vol. 543. pp. 196-202. **(Scopus, Web Of Science)**

39. Korobiichuk I., Davydenko L., Davydenko V., Davydenko N. Information support the operative control procedures of energy efficiency of operation modes of municipal water supply system facilities. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. vol. 920. pp. 571-582. **(Scopus)**

40. Davydenko N., Korobiichuk I., Davydenko L., Nowicki M., Davydenko V. Identification of cyclic changes in the operation mode of the production facility based on the monitoring data. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1044. pp. 189-197. **(Scopus)**

41. Korobiichuk I., Davydenko L., Davydenko N., Davydenko V. Control of the Operation Mode of the Production Facility Based on the Relevant Characteristics of the Technological Process. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 1140. pp 57-66. **(Scopus)**

Статті в інших наукових виданнях:

42. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V., Davydenko N. Control of Operation Modes Efficiency of Complex Technological Facilities Based on the Energy Efficiency Monitoring. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. Proceedings. pp. 531-540. **(Scopus, Web Of Science)**

43. Davydenko L., Rozen V., Davydenko V. and Davydenko N. Construction of the Energy Baseline of the Pumping Station of Water Supply Taking into Consideration Cyclic Changes in Water Consumption. *2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems*, 2019. Proceedings. IEEE Catalog Number (IEEE Part Number): CFP19U02-USB. pp. 250-262. **(Scopus, Web Of Science)**

44. Davydenko L., Davydenko N. Integration of procedures of benchmarking and energy efficiency control in energy management system of municipal water supply enterprise. *Energetica Moldovei-2016: Aspecte regionale de dezvoltare : Rapoarte*. Chișinău: S. n., 2016. Ed. 3. pp.123-131.

45. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Комплексне оцінювання рівня енергоефективності водогосподарств як складних виробничих систем. *Промислова електроенергетика та електротехніка*. 2010. №6. С 20-24.

46. Давиденко Л.В. Завдання та основні етапи системи бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів складних виробничих систем. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №10. С. 15-20.

47. Давиденко Л.В. Механізм бенчмаркінгу енергоефективності об'єктів складних виробничих систем та принципи його реалізації. *Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №11. С. 11-18.

48. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Призначення процедур комплексного контролю рівня ефективності енергоспоживання об'єктів водопостачання в системі енергоменеджменту водопостачального підприємства. *Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ*. 2016. С. 73-79.

49. Davydenko N., Davydenko V., Davydenko L. Information support for the procedure of power consumption planning in the municipal water supply system. *Modeling, Control and Information Technologies*. 2019. No. 3. pp. 29-32.

50. Давиденко Л.В. Бенчмаркінг енергоефективності об'єктів складних виробничих систем: основні складові та принципи їх реалізації. в кн. : Економічна безпека територіально-виробничих комплексів: енергетика, екологія, інформаційні технології : **монографія** / Коцко Т.А., Чеховська М. М., Лісовські О.Л. [та ін.]; за наук. ред. Лук'яненка С.О., Караєвої Н.В. Київ : «МП Леся», 2015.С. 115- 119).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

51. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Визначення ефективності енерговикористання у виробничих системах за допомогою енергетичного моніторингу. *Підвищення ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції (14-16.06.2012). Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2012. – С. 16-18.

52. Давиденко Л.В., Негодюк Р.В. Рейтингування об'єктів складної виробничої системи як засіб визначення їх рівня енергоефективності. *Підвищення рівня*

ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції (27-29.06.2014). Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2014. С. 79-80.

53. Давиденко Л.В. Принципи побудови інтегрованої системи моніторингу енергоефективності для підприємства водопровідно-каналізаційного господарства. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS'15.* 36. тез доповідей II міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (19-21.05.2015). Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 39-43

54. Коменда Т.І., Коменда Н.В., Давиденко Л.В. Компактність графіків електричного навантаження. *Оптимальне керування електроустановками. ОКЕУ-2015.* 36. тез доповідей III міжнародної науково-практичної конференції (14-15.10.2015). Вінниця: ВНТУ, 2015. С. 31.

55. Давиденко Л.В. Призначення та завдання моніторингу ефективності енергоспоживання в складних виробничих системах. *Моніторинг енерго- та ресурсо-використання в складних виробничих системах.* Матеріали доповідей I всеукраїнського наукового семінару (29 квітня 2015 р.). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 34-37.

56. Давиденко Л.В. Використання методології бенчмаркінгу для оцінювання рівня ефективності енерговикористання. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах.* Матеріали доповідей V всеукраїнського наукового семінару (15.05.2015). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. С. 56-58

57. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Завдання та принципи організації комплексного контролю ефективності енерговикористання в системах комунального водопостачання. *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика.* Збірник наукових праць XVII міжнародної науково-технічної конференції (17-19.05.2016). Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 1/2016 (4). С. 201-203

58. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Система комплексного контролю енергоефективності режимів роботи об'єктів комунального водопостачання.

Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку. Збірник наукових праць III міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (30.05-01.06.2016). Київ, НТУУ «КПІ», 2016. С. 94-95

59. Давиденко Л.В. Інтегрована системи моніторингу енергоефективності об'єктів водопостачання. *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали V міжнародної конференції (26-28.05.2016). Луцьк: РВВЛНТУ, 2016. С. 55-56

60. Давиденко Л.В., Розен В.П., Давиденко Н.В. Принципи побудови базового рівня електроспоживання об'єктів водопостачання з урахуванням впливу зовнішніх чинників. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. Збірник наукових праць IV міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (25-27.04.2017). Київ, НТУУ «КПІ», 2017. С. 112-113.

61. Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Monitoring and Targeting Systems об'єктів водопостачання: процедура планування ефективного електроспоживання. *Оптимальне керування електроустановками – ОКЕУ'2017*. Тези IV міжнародної науково-технічної конференції (11-13.10.2017). Вінниця: ВНТУ, 2017. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okeu/okeu/schedConf/presentations>

62. Давиденко Л.В. Аспекти комплексного контролю енергоефективності режимів роботи об'єктів комунального водопостачання. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальних господарствах та на промислових підприємствах*. Матеріали доповідей VI всеукраїнського наукового семінару (01.06.2017). Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2017. С.33-36

63. Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Виявлення та урахування циклічних змін водоподачі під час контролю ефективності електроспоживання насосних станцій. *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку*. зб. наук. праць V міжнародної науково-технічної та навчально-методичної конференції (17-19.04.2018). Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. С.101-102.

64. Давиденко Л.В. Принципи застосування концепції бенчмаркінгу для аналізу енергоефективності виробничих об'єктів. *Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах*. Матеріали VII

міжнародної науково-практичної конференції (20-23.06.2018). Луцьк : ІВВ Луцького НТУ, 2018. С. 61-64.

65. Давиденко Л.В., Давиденко В.А., Давиденко Н.В. Побудова моделі електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням циклічних змін водоспоживання. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій*. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції (20-21.06.2019). Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2019. С. 7-9

66. Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Призначення бенчмаркінгу в системі контролю енергоефективності виробничих об'єктів. *Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах*. Матеріали доповідей VII всеукраїнського наукового семінару (21-22.06.2019). Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2019. С. 34-37.

Авторські свідоцтва:

67. Свідоцтво про авторське права на технічний твір № 37831. Методика оцінювання рівня ефективності енерговикористання на об'єктах підприємства комунального водопостачання та водовідведення / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко В.А. Заявка № 37897 від 09.02.2011. Зареєстр. 08.04.2011

68. Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 83989. Процедура формалізації циклічних змін водоподачі насосних станцій комунального водопостачання / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 85055 від 06.11.2018. Зареєстр. 26.12.2018. Опубл. 25.01.2019. Бюл. № 51. С.851

69. Свідоцтво про авторське право на науковий твір № 85617. Процедура побудови базового рівня електроспоживання насосної станції водопостачання / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 85617 від 31.01.2019. Зареєстр. 11.02.2019. Опубл. 26.04.2019. Бюл. № 52. С.644

70. Свідоцтво про авторське право на науковий твір №88363. Методика контролю ефективності електроспоживання насосної станції водопостачання з урахуванням впливу сезонних та соціальних чинників / Розен В.П., Давиденко Л.В., Давиденко Н.В. Заявка № 89934 від 16.04.2019. Зареєстр. 08.05.2019. Опубл.

26.07.2019. Бюл. № 53. С.433.

Відомості про апробацію результатів дисертації:

- 3RD international conference «Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development» September 29 – October 01, 2016, Chisinau, Republic of Moldova;
- International conference «System, Control and information Technology, SCIT-2016», Industrial Research Institute for Automation and Measurements, May 20-21, 2016, Warsaw, Poland;
- XXIII Konferencja Naukowo-Techniczna «Automation 2019. Automatyzacja Nowości i Perspektywy», Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, 27-29 marca 2019, Warsaw, Poland;
- International conference «Mechatronics'2019: Computing in Mechatronics», Warsaw University of Technology, September 16-18, 2019, Warsaw, Poland;
- 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, April 17-19, 2019, Kyiv, Ukraine;
- 2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange - DSMIE-2019, Lutsk National Technical University, June 11-14, 2019, Lutsk, Ukraine;
- XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna «Automation 2020. Automatyzacja Nowości i Perspektywy», Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, 18-19 marca 2020, Warsaw, Poland;
- 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, May 12-14, 2020 p., Kyiv, Ukraine;
- International Conference on Electrical, Electronic and Information Sciences, Vilnius Gediminas Technical University, April 30, 2020, Vilnius, Lithuania;
- Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України», 2009 p., 2010 p., 2011 p., 2012 p., 2013 p., 2014 p., 2015 p., 2016 p., 2017 p., 2018 p., 2019 p. ХНТУСГ, м. Харків;

- Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика», 2010 р., 2011 р., 2016 р., КрНУ, м. Кременчук;
- Міжнародна науково-практична конференція «Оптимальне керування електроустановками», 2015 р., 2017 р. ВНТУ, м. Вінниця;
- Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS», 2015 р., 2016 р., 2017 р., 2018 р. Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ;
- Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» 2016 р., НТУУ «КПІ», м. Київ;
- Міжнародна конференція «Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах», 2010 р., 2012р., 2014 р., 2016р., 2018 р. Луцький НТУ, м. Луцьк;
- IV Міжнародна науково-технічна конференція «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки, приладобудування і комп'ютерних технологій», присвячена 80-ти річчю з дня народження професора Я.І. Проця, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 20-21.06 2019 року, м. Тернопіль;
- III international scientific and practical conference Automated Control and Information Technologies. November 14-16, 2019, NUWEE, Rivne.
- Всеукраїнський науковий семінар «Проблеми і перспективи енергозбереження в комунальному господарстві та на промислових підприємствах», 2009 р., 2011 р., 2013 р., 2015р., 2017 р., 2019 р.), Луцький НТУ, м. Луцьк;
- Всеукраїнський науковий семінар «Моніторинг енерго- та ресурсовикористання в складних виробничих системах», 2015 р., Луцький НТУ;
- Науково-практичний семінар з міжнародною участю «Економічна безпека держави і науково-технологічні аспекти її забезпечення» (Недінські читання, 2015) (20-21 жовтня, 2015 р.), НТУУ «КПІ», м.Київ.